

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Филиал
«Минский радиотехнический колледж»

С. Н. Анкуда, М. Ф. Прудник, В. В. Шаталова

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано учреждением образования
«Республиканский институт профессионального образования»
Министерства образования Республики Беларусь
в качестве пособия для учащихся учреждений образования,
реализующих образовательные программы среднего специального образования
по специальностям
«Микро- и нанoeлектронные технологии и системы», «Микроэлектроника»*

Минск БГУИР 2018

УДК 538.9(076.5)
ББК 22.37я73
А67

Рецензенты:

заведующий кафедрой технологии машиностроения
Белорусского национального технического университета,
член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
доктор технических наук, профессор В. К. Шелег;

главный конструктор ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
кандидат технических наук, доцент С. А. Ефименко;

главный технолог ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ» А. В. Булыгин

Анкуда, С. Н.

А67 Физика твердого тела. Лабораторный практикум : пособие / С. Н. Анкуда,
М. Ф. Прудник, В. В. Шаталова. – Минск : БГУИР, 2018. – 140 с. : ил.
ISBN 978-985-543-346-1.

Приводится описание 18 лабораторных работ по изучению процессов, протекающих в твердых телах, а также по исследованию полупроводниковых приборов: светоизлучающего диода, фотодиода, фоторезистора, биполярного транзистора, канального (полевого) транзистора. Каждая лабораторная работа содержит задание, основные теоретические сведения, порядок выполнения и контрольные вопросы.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы в области физики твердого тела.

УДК 538.9(076.5)
ББК 22.37я73

ISBN 978-985-543-346-1

© Анкуда С. Н., Прудник М. Ф., Шаталова В. В., 2018
© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», 2018

Введение

Изучение дисциплины «Физика твердого тела» базируется на знании фундаментальных законов физики, химии и математики. Изучаются процессы, протекающие в твердых телах, контактные явления, влияние температуры и излучений на свойства твердых тел, в том числе на полупроводниковые материалы и структуры, тепловые и магнитные свойства материалов.

Для более глубокого усвоения теоретического материала, получения практических навыков и умений учебной программой дисциплины предусмотрено выполнение лабораторных работ.

В лабораторном практикуме представлены методические указания по выполнению 18 лабораторных работ (36 учебных часов). Содержание работ и их характер отражают современное состояние физики твердого тела, микро- и нанoeлектроники. Методические указания по выполнению лабораторных работ №1–10 (20 учебных часов) предназначены для учащихся специальности «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы», лабораторных работ №11–18 – для специальности «Микроэлектроника».

Общие указания к проведению лабораторных работ

До начала проведения работ в лаборатории любого вида преподавателям, сотрудникам, а также учащимся необходимо изучить:

1 Инструкцию по технике безопасности (мерам безопасности) в лаборатории.

2 Инструкцию по обеспечению пожарной безопасности работниками и учащимися в учебных лабораториях и учебно-производственных мастерских колледжа.

3 Программу инструктажа на рабочем месте преподавателей и учащихся колледжа в лаборатории.

4 Инструкцию по проведению лабораторных работ в лаборатории.

Инструкция по проведению лабораторных работ в лаборатории «Физика твердого тела, микро- и нанoeлектроника»

1 До начала лабораторных работ учащиеся должны пройти инструктаж по технике безопасности (ТБ) и расписаться в журнале первичного инструктажа по ТБ.

2 Первичный инструктаж по ТБ включает в себя ознакомление учащихся с правилами электробезопасности при выполнении лабораторных работ и последующую проверку знаний учащихся по ТБ. Нарушение правил ТБ при выполнении лабораторных работ не допустимо.

3 Для выполнения лабораторных работ учащиеся распределяются по бригадам по 2–3 человека в каждой.

4 Перед началом лабораторной работы учащийся опрашивается по основным теоретическим сведениям. Результаты опроса являются основанием допуска к выполнению лабораторной работы.

5 После окончания лабораторной работы учащиеся должны отключить источник питания, разобрать схему, сдать измерительные приборы и соединительные провода лаборанту или преподавателю, убрать рабочее место.

6 Защита лабораторной работы осуществляется на основе оформленного отчета.

7 Учащиеся, пропустившие учебное занятие, выполняют работы в дополнительное время.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №1

Оптические приборы, используемые для измерения расстояний

1.1 Цель работы

Изучить устройство микроскопов и приобрести навыки проведения измерений с их помощью.

1.2 Задание

1 Изучить устройство микроскопов МИР-2, МБС-10, МИМ-7, МИИ-4.

2 Освоить навыки проведения измерений с помощью микроскопов МИР-2, МБС-10, МИМ-7, МИИ-4.

3 Получить у преподавателя образец и изучить его: определить линейные размеры, дефекты и т. д.

4 Выполнить измерения, заданные преподавателем, результаты исследований записать в таблицы 1.1, 1.2.

Таблица 1.1

Номер опыта	Объект изучения	Цена деления	Размер образца
1...			
12			

Таблица 1.2

Номер опыта	Объект изучения	Цена деления	Размер рабочего поля
1...			
12			

5 Изучить конструкцию и принцип работы электронного микроскопа.

6 Дать сравнительный анализ магнитной линзы электронного микроскопа и оптической.

7 Сделать выводы по проделанной работе.

1.3 Оснащение работы

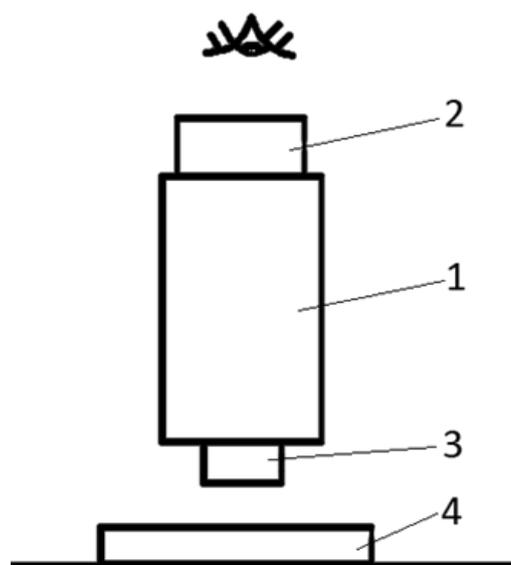
Микроскопы МИР-2, МБС-10, МИМ-7, МИИ-4, электронный микроскоп, набор образцов.

1.4 Основные теоретические сведения

1.4.1 Микроскопы МИР-2, МБС-10

Микроскопы типа МИР-2

Для изучения мелких объектов, структуры вещества, определения малых расстояний используют микроскопы. Устройство простого микроскопа показано на рисунке 1.1.



1 – тубус; 2 – окуляр; 3 – объектив; 4 – предметный столик

Рисунок 1.1 – Схематическое изображение устройства простого микроскопа

Увеличение N , даваемое микроскопом, зависит от фокусного расстояния объектива, окуляра и от длины тубуса:

$$N = \frac{L \cdot S}{f_1 \cdot f_2},$$

где L – оптическая длина тубуса (расстояние между фокусами объектива и окуляра), м;

S – расстояние наилучшего зрения (0,25 м для нормального глаза), м;

f_1 – фокусное расстояние объектива, м;

f_2 – фокусное расстояние окуляра, м.

Отсчетный микроскоп МИР-2 (микроскоп измерительный) (рисунок 1.2) – упрощенная модель измерительных микроскопов – предназначен для измерения мелких предметов и расстояний между штрихами, точками и другими неровностями поверхностей. Используется в производственных лабораториях, отделах технического контроля и учебных заведениях. Микроскоп имеет отсчетную окулярную шкалу, увеличение – от 19 до 33 раз, пределы измерений – от 0,015 до 6 мм.

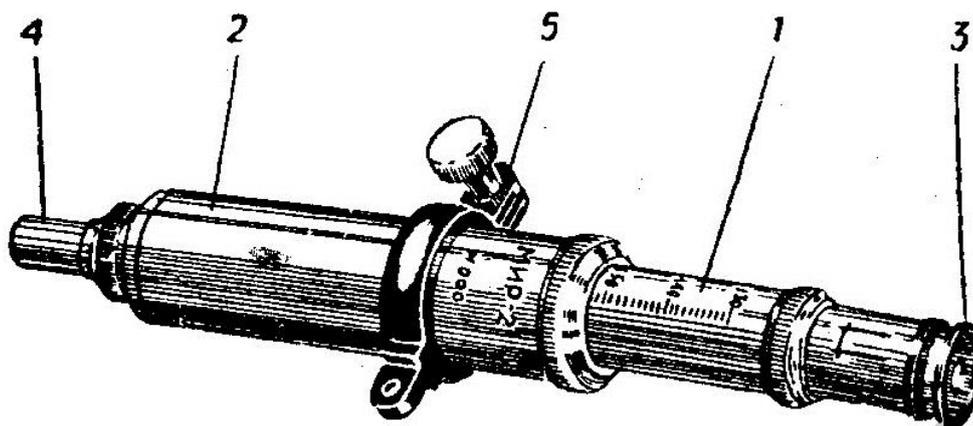
Для удобства работы микроскоп устанавливают на штатив, затем фокусируют на исследуемую поверхность, находят в поле зрения исследуемый объект, число делений и цену деления окулярной шкалы.

Линейный размер наблюдаемого объекта L , м, определяют по формуле

$$L = \alpha \cdot \Pi,$$

где α – цена деления окулярной шкалы, м/дел;

Π – число делений окулярной шкалы, безразмерная величина.



1 – тубус; 2 – корпус; 3 – окуляр; 4 – объектив; 5 – хомутик

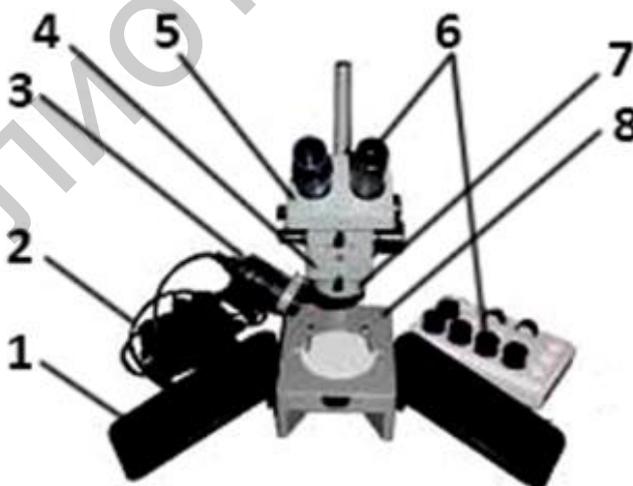
Рисунок 1.2 – Внешний вид микроскопа МИР-2

Микроскоп типа МБС-10

Микроскоп биологический стереоскопический МБС-10 предназначен для наблюдения объемных объектов, тонких пленочных и прозрачных объектов (рисунок 1.3).

Наблюдение может производиться при естественном и искусственном освещении. Микроскоп имеет увеличение от 3,3 до 100,8 раз, пределы измерений – от 39 до 2,4 мм.

Исследуемый объект помещают на предметный столик, проводят фокусировку и наблюдение.



1 – подлокотники; 2 – блок питания; 3 – осветитель;
4 – барабан с корпусом; 5 – бинокулярная насадка;
6 – окуляры; 7 – объектив; 8 – штатив

Рисунок 1.3 – Внешний вид микроскопа МБС-10

1.4.2 Микроскопы МИМ-7, МИИ-4

Микроскоп МИМ-7

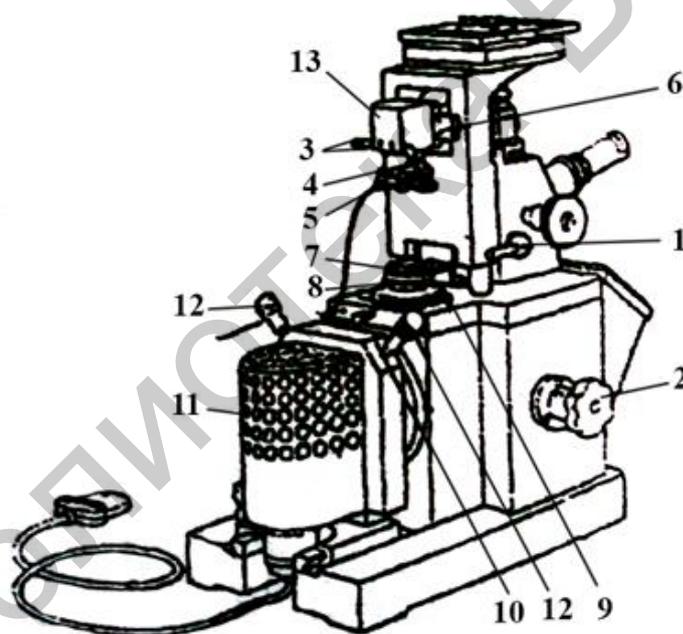
Микроскоп металлографический МИМ-7 предназначен для наблюдения и фотографирования микроструктуры вещества в обыкновенном свете, в светлом и темном поле и в поляризованном свете.

Набор объективов и окуляров микроскопа обеспечивает увеличение от 50 до 1440 раз при визуальном наблюдении и от 70 до 1350 раз при фотографировании.

Общий вид микроскопа показан на рисунках 1.4 и 1.5.

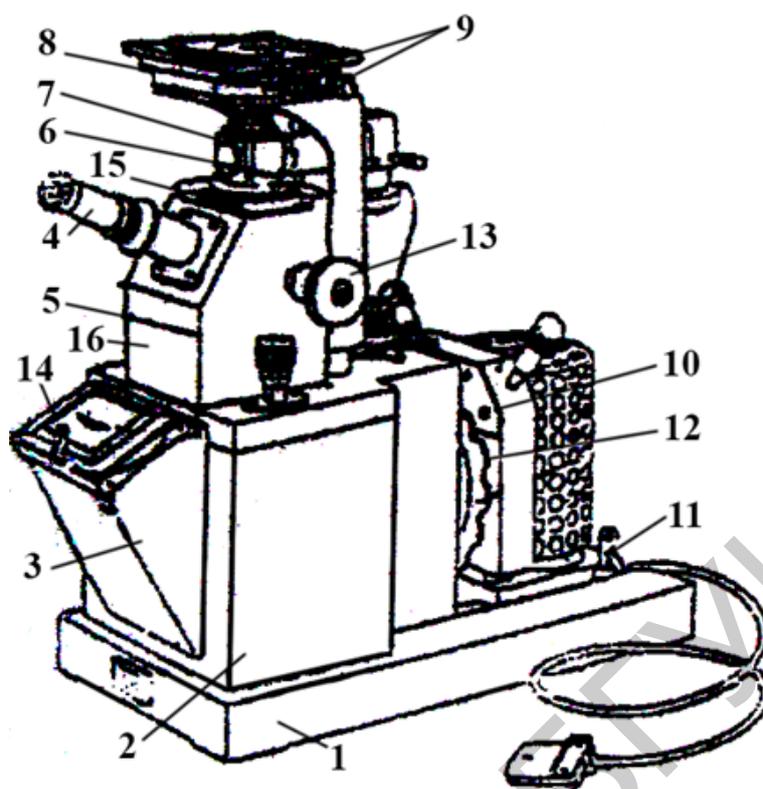
Микроскоп состоит из четырех основных узлов:

- 1) осветителя, установленного на направляющем основании;
- 2) корпуса прибора с фотокамерой и узлом апертурной диафрагмы;
- 3) верхней части прибора с иллюминатором, визуальным тубусом и механизмами грубой подачи предметного столика и микрометрической подачи объектива;
- 4) предметного столика.



- 1 – стопорный винт грубой подачи; 2 – рукоятка окуляров при фотографировании; 3 – центрировочные винты полевой диафрагмы; 4 – рукоятка полевой диафрагмы; 5 – фотозатвор; 6 – рамка с дополнительными линзами; 7 – оправа дополнительной линзы; 8 – кольцо апертурной диафрагмы; 9 – винт смещений апертурной диафрагмы; 10 – стопорный винт; 11 – осветитель; 12 – центровочные винты; 13 – кожух пентапризмы

Рисунок 1.4 – Общий вид микроскопа МИМ-7 со стороны осветителя



1 – основание микроскопа; 2 – корпус; 3 – фотокамера;
 4 – микрометричная подача объектива; 5 – визуальный тубус;
 6 – рукоятка диафрагмы; 7 – иллюминатор; 8 – предметный стол;
 9 – рукоятка перемещения стола; 10 – осветитель; 11 – стопорное устройство осветителя; 12 – рукоятка светофильтров; 13 – рукоятка грубой подачи стола;
 14 – рамка с матовым стеклом; 15 – анализатор; 16 – корпус центральной части

Рисунок 1.5 – Общий вид микроскопа МИМ-7 с правой стороны

Микроскоп МИИ-4

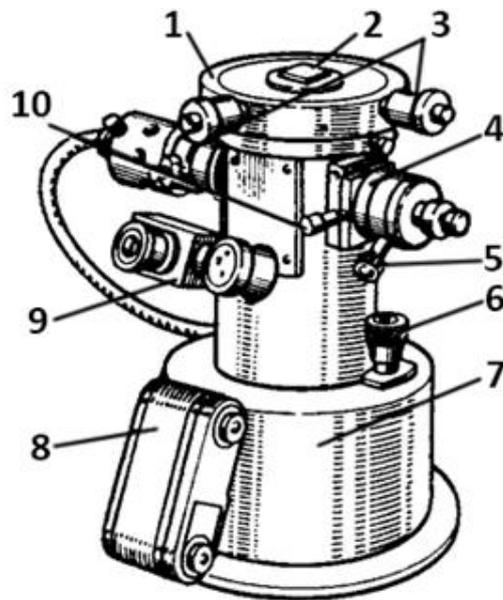
Микроинтерферометр Линника (микроскоп) МИИ-4 предназначен для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты неровностей тонкообработанных поверхностей.

Общий вид МИИ-4 показан на рисунке 1.6.

Набор объективов и окуляров обеспечивает:

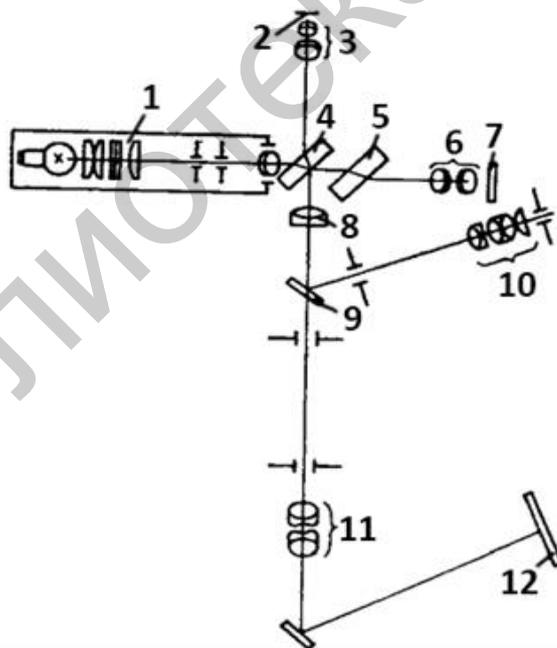
- 530-кратное увеличение при визуальном наблюдении и 260-кратное – при фотографировании;
- пределы измерения высоты неровностей от 0,1 до 0,8 мкм;
- линейное поле в плоскости предмета 0,37 мм при визуальном наблюдении и 0,08...0,12 мм при фотографировании;
- пределы перемещения предметного столика от 0 до 10 мм;
- цену деления шкал барабанов микрометрических винтов столика – 0,005 мм.

Оптическая система микроинтерферометра МИИ-4 показана на рисунке 1.7.



- 1 – предметный столик; 2 – образец; 3, 4 – микрометрические винты;
 5 – кольцо для измерения апертурной диафрагмы;
 6 – фокусировка микроскопа; 7 – круглое основание;
 8 – фотоаппарат; 9 – винтовой окулярный микрометр; 10 – осветитель

Рисунок 1.6 – Общий вид микроинтерферометра МИИ-4



- 1 – осветитель с линзами; 2 – предметный столик; 3 – объектив;
 4 – разделительная пластинка; 5 – компенсатор; 6 – объектив;
 7 – зеркало; 8 – объектив; 9 – зеркало; 10 – окуляр;
 11 – конденсор; 12 – матовое стекло

Рисунок 1.7 – Оптическая система микроинтерферометра МИИ-4

Настройка микроинтерферометра МИИ-4

- Включить лампу и положить на столик микроинтерферометра объект исследуемой поверхностью вниз к объективу. При измерении высоты неровностей на вогнутых сферических поверхностях на предметный столик необходимо установить специальный вкладыш.

- Произвести настройку освещения, для чего перемещением патрона установить нить лампы так, чтобы ее изображение было резко видно в зрачке объектива (изображение нити лампы и зрачок объектива хорошо видны при вынудом окуляре). С помощью центровочных винтов отцентрировать изображение нити лампы относительно зрачка объектива, апертурная диафрагма при этом должна быть полностью открыта.

- Вставить окуляр в переходную втулку, которую установить на тубус микроинтерферометра. Повернуть рукоятку так, чтобы стрелка на ней стояла вертикально.

- С помощью микрометрического винта сфокусировать микроинтерферометр на исследуемую поверхность.

- Поворотом рукоятки включить правую часть интерференционной головки (стрелка на рукоятке должна быть в горизонтальном положении), при этом в поле зрения должны быть видны интерференционные полосы.

- С помощью микрометрического винта добиться наиболее резкого изображения полос и исследуемой поверхности. Если при резкой фокусировке на объект наиболее резкие и контрастные интерференционные полосы получились не в центре поля зрения, то следует отвернуть контргайку и, вращая винт, привести полосы в центр поля зрения. Затем проверить фокусировку по исследуемой поверхности и закрепить винт контргайкой. Винтом и контргайкой разрешается пользоваться только в данном случае, в других случаях трогать винт и контргайку не рекомендуется.

- Для получения большей контрастности полос нужно поворотом кольца несколько уменьшить отверстие апертурной диафрагмы. Вращением винта вокруг его оси установить необходимый для работы интервал между полосами. Поворотом винта вокруг оси интерференционной головки установить интерференционные полосы перпендикулярно штрихам на исследуемой поверхности.

- Для работы с монохроматическим светом включить один из светофильтров перемещением пластинки до упора.

Определение высоты неровностей

Измерение глубины канавок (следов от инструмента) можно производить двумя способами: «на глаз» и с помощью винтового окулярного микрометра (рисунок 1.8).

При правильной настройке микроинтерферометра в его поле зрения должны быть видны одновременно исследуемая поверхность и интерференционные полосы, изогнутые в тех местах, где проходят канавки и царапины, причем интерференционные полосы должны быть ориентированы перпендикулярно направлению царапин или рисок.

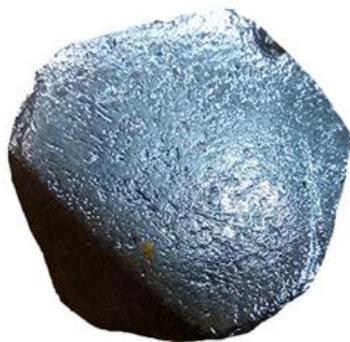


Рисунок 1.8 – Исследуемая поверхность

При измерении глубины царапины или риски «на глаз» следует определить, на какую долю интервала между полосами или на сколько интервалов изгибается полоса в месте прохождения царапины.

При работе с белым светом глубина H , мкм, канавки или риски определяется по формуле

$$H = 0,27 \cdot \Delta N,$$

при работе с монохроматическим светом – по формуле

$$H = 0,5 \cdot \lambda \cdot \Delta N,$$

где λ – длина волны света, указанная в технических требованиях, нм;

ΔN – величина изгиба полосы в долях интервала, мкм:

$$\Delta N = n \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2},$$

где n – число интервалов между полосами.

Вычисление высоты неровностей

При работе в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на исследуемой поверхности, равной 0,27 мкм.

В таком случае глубина канавки H вычисляется по формуле

$$H = 0,27n \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2},$$

где n – число интервалов между полосами;

N_1 – первый отсчет при измерении интервала между полосами;

N_2 – второй отсчет при измерении интервала между полосами;

N_3 – первый отсчет при измерении величины изгиба полосы;

N_4 – второй отсчет при измерении величины изгиба полосы.

Например, при измерении интервала между полосами сняты отсчеты: $N_1 = 5,6$; $N_2 = 6,4$; $n = 1$; при измерении величины изгиба полос получены отсчеты: $N_3 = 5,67$ и $N_4 = 7,36$. Следовательно,

$$H = 0,27n \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} = 0,27 \cdot 1 \cdot \frac{5,67 - 7,36}{5,67 - 6,4} = 0,62 \text{ мкм.}$$

Для определения H_{cp} необходимо произвести на исследуемом участке поверхности целую серию измерений.

Фотографирование

Микроинтерферометр МИИ-4 отрегулирован так, что при фокусировке на резкость по визуальному тубусу на фотопленке получается резкое изображение. При переходе от визуального наблюдения к фотографированию следует применять симметричный окуляр, кратный 15 (15×), со специальной сеткой (прямоугольником), подобной кадру пленки. При работе с симметричным окуляром на тубус микроинтерферометра необходимо надеть переходную втулку и в нее вставить окуляр.

При работе с винтовым окулярным микрометром переходную втулку надо снять. Окуляр устанавливают так, чтобы длинная сторона прямоугольника была расположена вертикально. Прямоугольник (сетка) определяет фотографируемый участок.

Специальная сетка в оправе находится в комплекте микроинтерферометра: перед работой она должна быть ввернута в окуляр вместо шкалы в оправе.

Фотографирование производится в следующем порядке:

1) сфокусировать микроинтерферометр на резкость изображения по визуальному тубусу и отрегулировать диафрагму так, чтобы получилось наиболее контрастное изображение интерференционных полос и исследуемой поверхности;

2) установить вместо матового стекла фотокамеру;

3) повернув до упора накатанное кольцо, вывести из хода лучей зеркало визуального тубуса;

Фотографирование можно производить на пленку любой светочувствительности, подобрав при этом соответствующую экспозицию.

1.4.3 Электронные микроскопы

Различают два типа микроскопов: оптические и электронные, которые применяют для исследования и рассмотрения объектов.

Электронные и оптические микроскопы имеют ограничения в разрешающей способности в зависимости от длины волны частиц, освещающих исследуемые объекты, и размеров объекта. Оптические микроскопы дают кратность увеличения порядка 1000...2000 раз и предел разрешения составляет порядка 100 нм. Электронный микроскоп – это прибор, позволяющий получать сильно увеличенное изображение объектов, используя для их освещения поток электронов.

В оптических микроскопах используются оптические (стеклянные) линзы, а в электронных – магнитные или электростатические. Принцип работы магнитных или электростатических линз основан на взаимодействии электрона (заряда) с магнитными или электростатическими полями.

Электронные микроскопы могут быть следующих видов:

- 1) просвечивающий электронный;
- 2) растровый электронный;
- 3) сканирующий туннельный;
- 4) сканирующий атомно-силовой;
- 5) отражательный электронный;
- 6) растровый просвечивающий электронный;
- 7) фотоэмиссионный электронный;
- 8) полнофункциональный сканирующий зондовый.

Электронные микроскопы имеют широкое применение в различных областях науки, техники и производства, в частности:

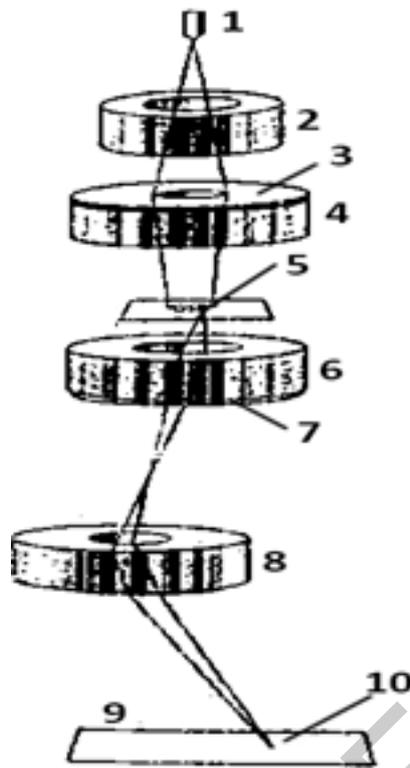
- 1) при исследовании свойств полупроводников;
- 2) для корректировки микроэлектронных изделий в ходе их создания;
- 3) в метрологии трехмерных объектов;
- 4) в дефектоскопии и анализе неисправностей сверхминиатюрных устройств;
- 5) в электронной томографии;
- 6) в нанометрологии;
- 7) для тестирования и снятия характеристик микроэлектронных устройств;
- 8) в нанотехнологии и др.

В состав простейшего электронного (просвечивающего) микроскопа входят следующие компоненты:

- 1) вакуумная система для удаления воздуха и увеличения таким образом длины свободного пробега электронов;
- 2) предметный столик, на котором находятся держатель образца, механизмы для изменения положения и шлюзы;
- 3) источник электронов – электронный прожектор, или электронная пушка, для генерирования потока (пучка) электронов;
- 4) источник высокого напряжения для ускорения электронов;
- 5) апертуры – ограничители расходимости электронного пучка;
- 6) набор электромагнитных линз (а иногда электростатических пластин) для управления электронным лучом и контроля за ним;
- 7) экран, на который проецируется увеличенное электронное изображение, или детекторы цифрового изображения.

Поток электронов в электронном микроскопе создается посредством термоэлектронной или полевой эмиссии. В первом случае при высокой температуре электроны испускаются проволокой из вольфрама (нить накала). Затем электроны ускоряются высокой разностью потенциалов и фокусируются на образце электромагнитными или электростатическими линзами. Прошедший через образец поток электронов содержит информацию об электронной плотности, фазе и периодичности; эти данные используются при формировании изображения.

Схематично электронный просвечивающий микроскоп показан на рисунке 1.9.



1 – источник электронов; 2 – ускоряющая система; 3 – диафрагма;
 4 – конденсорная линза; 5 – образец; 6 – объективная линза;
 7 – диафрагма; 8 – проекционная линза; 9 – экран или пленка;
 10 – увеличенное изображение

Рисунок 1.9 – Обычный просвечивающий электронный микроскоп

Схематично магнитная линза электронного микроскопа показана на рисунке 1.10.

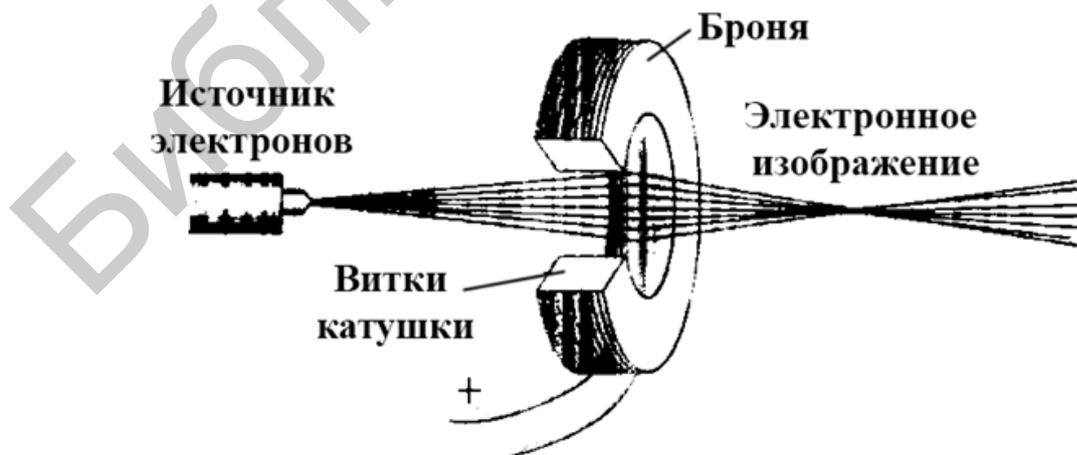


Рисунок 1.10 – Схематическое изображение магнитной линзы

На рисунке 1.11 изображен сканирующий электронный микроскоп.



Рисунок 1.11 – Внешний вид сканирующего электронного микроскопа

1.5 Порядок выполнения работы

1 Изучить документацию, описывающую устройство и правила пользования микроскопами МИР-2 и МБС-10.

2 Подготовить микроскоп МБС-10 к работе. Сначала включить вилку шнура блока питания микроскопа в сеть.

Включить тумблер СЕТЬ блока питания. Расположить образец на предметном столике микроскопа. Сфокусировать микроскоп на объект, вращая рукоятки механизма фокусировки. Установить межзрачковое расстояние прибора в соответствии с базой глаз наблюдателя, вращая рукоятку механизма настройки.

Для оценки линейных размеров или площади участков объекта необходимо в одну из окулярных трубок прибора вставить окуляр со шкалой или сеткой. Механизмом диоптрийной наводки добиться резкого видения шкалы или сетки. Затем поворотом рукоятки механизма фокусировки добиться резкого изображения объекта. Чтобы определить линейные размеры или площадь, достаточно подсчитать число делений шкалы, которое укладывается в участке объектива, и умножить его на цену деления. После проведения всех измерений выключить тумблер СЕТЬ блока питания. Вынуть вилку шнура из розетки.

3 На полученном образце (пластине) провести измерения. Данные измерений записать в таблицу 1.1. Зарисовать изображения, увиденные с помощью микроскопа.

4 Изучить инструкцию пользования и устройство микроскопов МИИ-4, МИМ-7.

5 Подготовить приборы и изучаемый МИМ-7 к работе. Для этого включить вилку шнура блока питания МИМ-7 в сеть. Включить тумблер СЕТЬ блока питания. Расположить мерную линейку на предметном столике. Сфокусировать микроскоп на объект, вращая рукоятку механизма фокусировки. Провести измерения. После проведения измерений выключить тумблер СЕТЬ блока питания. Вынуть вилку шнура блока питания из розетки.

6 Получить у преподавателя образец (полупроводниковую пластину) для исследования. Изучить образец, провести измерения. Полученные данные измерений записать в таблицу 1.2.

7 Зарисовать изображение, увиденное с помощью микроскопа.

8 Изучить структурную схему магнитной линзы и электронного микроскопа.

9 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

1.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

1.7 Контрольные вопросы и задания

1 Основные узлы микроскопа.

2 От чего зависит увеличение, даваемое микроскопом?

3 Расшифровка аббревиатур МИР-2, МБС-10.

4 Назначение подсветки в микроскопе МБС-10.

5 Область применения микроскопов.

6 На каких операциях в микроэлектронике применяют микроскопы?

7 Назначение предметного столика.

8 Электрические параметры осветителя.

9 Порядок работы с МИМ-7, МИИ-4.

10 Сравнительная характеристика МИИ-4 и МИМ-7.

11 Технические данные МИМ-7 и МИИ-4.

12 Каково изображение оптических систем МИМ-7 и МИИ-4?

13 Настройка МИИ-4, МИМ-7.

14 Для чего используются электронные микроскопы?

15 Преимущества электронного микроскопа перед оптическим.

16 Принцип работы магнитной линзы.

Лабораторная работа №2

Определение ориентации кристаллографических плоскостей методом фигур травления и плотности дислокаций на поверхности простых и сложных полупроводников

2.1 Цель работы

Ознакомиться с металлографическим методом исследования полупроводниковых материалов; приобрести навыки исследования дислокаций на различных кристаллографических плоскостях.

2.2 Задание

1 Изучить образцы, рассмотреть полученные шлифы под микроскопом, произвести измерения и зарисовать изображение.

2 Данные измерений записать в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Номер опыта	Тип образца	Количество ямок травления	D , м	S , м ²	n , м ⁻²	$n_{\text{ср}}$, м ⁻²
1 ...						
12						

3 Определить плотность дислокаций по результатам измерений по формуле (2.1).

4 По фигурам травления определить кристаллографические плоскости (направления).

5 Изучить состав травителей для полировки, выявления дислокаций, фигур травления.

2.3 Оснащение работы

Металлографический микроскоп МИМ-7, образцы полупроводниковых пластин германия, кремния, арсенида галлия.

2.4 Основные теоретические сведения

Большинство полупроводниковых кристаллов относятся к кубической структуре, их элементарные ячейки имеют форму куба. Чередование атомов в ячейке строго периодическое, но указанная закономерность не всегда задается в реальных кристаллах. Кубическая решетка имеет три наиболее важные кристаллографические плоскости и направления, т. е. индексы кристалла – (111), (100), (110) (рисунок 2.1).

Физические свойства кристаллов зависят от координатного направления. Для выявления структуры слитка его подвергают травлению с малой скоростью травления.

Под травлением понимают процесс удаления слоя образца под действием химических реагентов. Разделяют сухое и жидкое травление. Процесс травления характеризуется скоростью травления V , м/с, т. е. снятием толщины слоя в единицу времени:

$$V = \frac{\Delta l}{\Delta t},$$

где Δl – изменение толщины слоя, м;

Δt – время, за которое происходит изменение толщины, с.

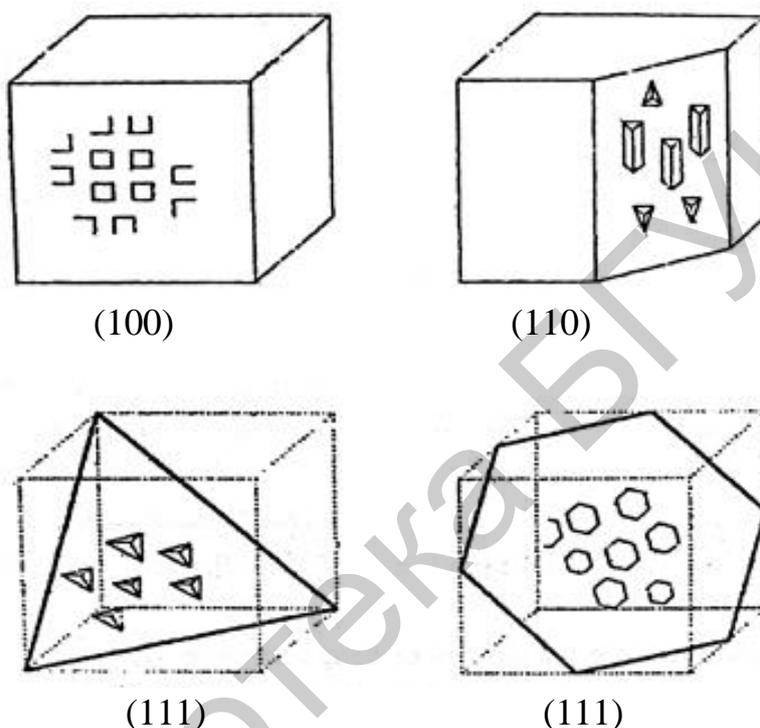


Рисунок 2.1 – Фигуры травления на основных кристаллографических плоскостях кубической решетки

Скорость травления зависит от рода материала, температуры, состава травителя. Травитель – химически активная среда, в которой проводится процесс травления, растворения. Состав травителя отличается для разных материалов.

Подготовительным этапом при изучении структуры полупроводника является полировка, которая производится химическим или механическим способом. Образованная поверхность полупроводника называется шлифом. На поверхности шлифа, приготовленного из поликристалла, после травления будут четко обнаруживаться границы зерен. Так как границы между зернами травятся быстрее, то они наблюдаются под микроскопом в виде темной сетки или линий (при большом увеличении).

Отдельные зерна могут иметь различные световые оттенки; это связано с тем, что зерна выходят на поверхность различными плоскостями, их характер и

скорость травления неодинаковы. Еще более четко наблюдаются зерна разного фазового состояния (рисунок 2.2).

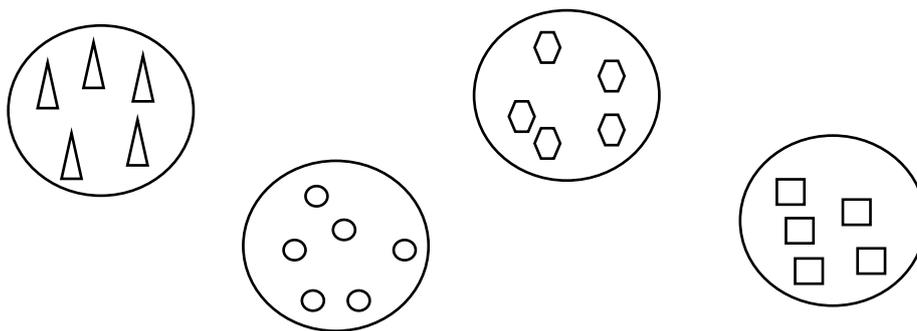


Рисунок 2.2 – Фигуры травления, видимые под микроскопом

Пластина полупроводника имеет структурные дефекты. Под структурными дефектами понимают небольшие области в кристалле, где нарушена периодичность в расположении атомов кристаллической решетки. Размеры их составляют несколько атомарных диаметров. Структурные дефекты возникают в результате появления смещенных или инородных атомов в узлах решетки, наложения двойников и, в особенности, дислокации. Дислокации образуются при росте кристаллов, деформациях, наличии больших градиентов температур и других условиях.

Полупроводниковые пластины (Ge, Si) травят в кислотных и щелочных травителях. Для травления кремния применяют щелочной травитель. Необходимы 3 мин травления в следующем кипящем составе: железосинеродистый калий – 160 г, щелочь KOH – 240 г, дистиллированная вода – 1 л или кислотный травитель HF (42%-я плавиковая кислота) – 25 частей, концентрированная азотная кислота HNO₃ – 25 частей, уксусная кислота CH₃COOH – 15 частей, бромистый калий KBr – 0,5 г/л. Для травления германия необходимы концентрированная 48%-я азотная кислота HNO₃ – 2 части, плавиковая 48%-я кислота HF – 1 часть.

Помимо элементарных полупроводников, имеется очень большое количество сложных полупроводниковых соединений: двойные, тройные, четырехкомпонентные и др.

Из сложных полупроводниковых соединений особый класс составляют двойные соединения типа A^mBⁿ, где $n + m = 8$ – номера групп элементов периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, а буквы A и B обозначают атомы элементов соответствующих групп. Из сложных соединений большое применение находят соединения вида A^{II}B^V, обладающие лучшими электрофизическими свойствами по сравнению с простыми (элементарными) полупроводниками.

Поэтому весь кристалл можно рассматривать как совокупность повторяющихся звеньев A^{III}B^V, в которых кратчайшее расстояние между A^{III} и B^V зависит от природы этих атомов.

Для выявления структуры образцов, а также структуры сторон А и В их подвергают травлению с малой скоростью травления. Состав травителя различен для разных структур $A^{III}B^V$. Химический травитель для арсенида галлия:

1) $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 1:(1...2):(4...6). Грань А выявляют ямки травления; грань В выявляют террасы;

2) $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 1:3:(0...4). Грань А выявляет полировка; грань В выявляют ямки травления.

При травлении арсенида галлия травителями 1 и 2 получили такие фигуры травления на гранях А и В (рисунки 2.3 и 2.4).

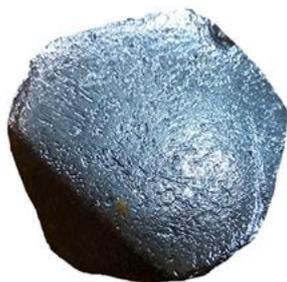


Рисунок 2.3 – Фигура травления на грани А пластинки арсенида галлия, полученная с помощью травителя 1



Рисунок 2.4 – Фигура травления на грани В пластинки арсенида галлия, полученная с помощью травителя 2

Дислокация характеризуется плотностью дислокаций n , м^{-2} , т. е. числом ямок на единицу площади:

$$n = \frac{N}{S}, \quad (2.1)$$

где N – количество ямок травления в поле зрения микроскопа, безразмерная величина;

S – площадь поля зрения микроскопа, м^2 .

Дислокации можно выявить при травлении специально подобранным травителем. Например, для кремния необходимы 3 мин травления в следующем кипящем составе: железосинеродистый калий – 160 г, щелочь КОН – 240 г, дистиллированная вода – 1 л; травление 4...5 мин в составе: плавиковая (42%-я)

HF кислота – 25 частей, концентрированная азотная кислота HNO_3 – 25 частей, уксусная кислота CH_3COOH – 15 частей, бромистый калий KBr – 0,5 г/л.

Для кремния необходимы 1...2 мин травления при комнатной температуре в составе: HNO_3 (48%-я) – 2 части; HF (48%-я) – 1 часть. Грань А выявляют ямки травления:

1) HF: H_2O_2 : H_2O в соотношении 1:(1...2):(4...6). Грань В выявляют террасы; грань А – полировка;

2) HF: HNO_3 : H_2O в соотношении 1:3:(0...4). Грань В выявляют ямки травления.

2.5 Порядок выполнения работы

1 Подготовить к работе микроскоп МИМ-7 согласно пунктам 4 и 5 лабораторной работы №1.

2 Получить у преподавателя образец (шлиф) или подготовить его самостоятельно по следующей технологии: выбрать пластину, провести ее механическую и химическую обработку. Промыть и просушить пластину.

3 Исследуемый образец положить на предметный столик микроскопа. Зарисовать область, увиденную под микроскопом.

4 Определить кристаллографические направления. Определить плотность дислокаций.

5 Данные измерений записать в таблицу 2.1.

6 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

2.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

2.7 Контрольные вопросы и задания

1 Классификация полупроводников.

2 Основные параметры полупроводниковых материалов.

3 Что такое травитель? Состав травителей. Свойства травителей.

4 Что такое фигуры травления?

Лабораторная работа №3

Исследование зависимости сопротивления проводников от температуры

3.1 Цель работы

Приобрести навыки исследования зависимости электрического сопротивления проводников и удельного сопротивления проводников от температуры.

3.2 Задание

1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, применяемыми в работе, знать их технические данные.

2 Собрать электрическую цепь согласно рисунку 3.1.

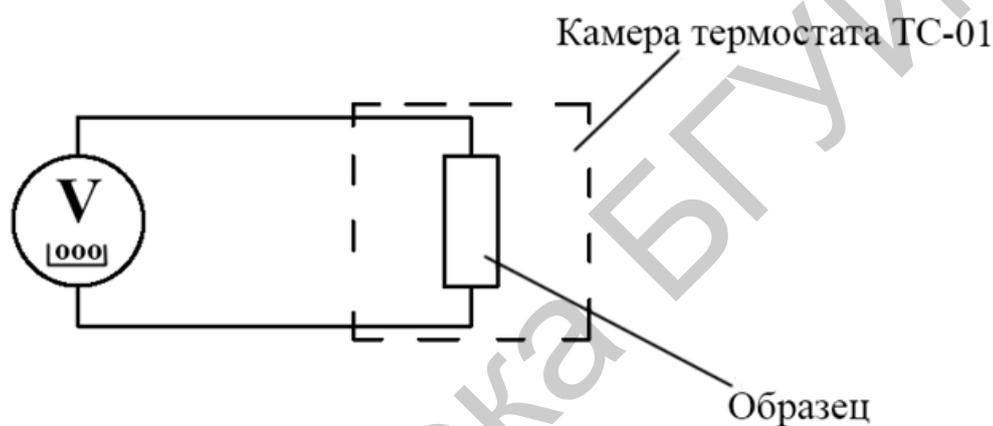


Рисунок 3.1 – Структурная схема соединения приборов

3 Измерить линейные размеры образца.

4 Через каждые 5...10 °С изменения температуры камеры термостата измерять сопротивление образца.

5 Данные эксперимента записать в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Номер опыта	$t, ^\circ\text{C}$	$R_0, \text{Ом}$	$l, \text{м}$	$r, \text{м}$	$S, \text{м}^2$	$R_t, \text{Ом}$	$\rho_0, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_t, \text{Ом}\cdot\text{м}$
1 ...								
12								

6 Начертить графики зависимостей $R = f(t)$, $\rho = f(t)$.

3.3 Оснащение работы

Мост постоянного или переменного тока, цифровой вольтметр типа В7-53, соединительные провода, измерительный микроскоп типа МИР-2, набор образцов, термостат ТС-01.

3.4 Основные теоретические сведения

В основу классификации твердых тел могут быть положены различные признаки. По величине удельного сопротивления или удельной электропроводности все твердые тела можно разделить на три большие группы: проводники (металлы и сплавы), полупроводники и диэлектрики.

При комнатной температуре удельная электропроводность металлов составляет $10^4 \dots 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, удельная электропроводность полупроводников – $10^4 \dots 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, удельная электропроводность диэлектриков – $10^{-10} \dots 10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ (рисунок 3.2).

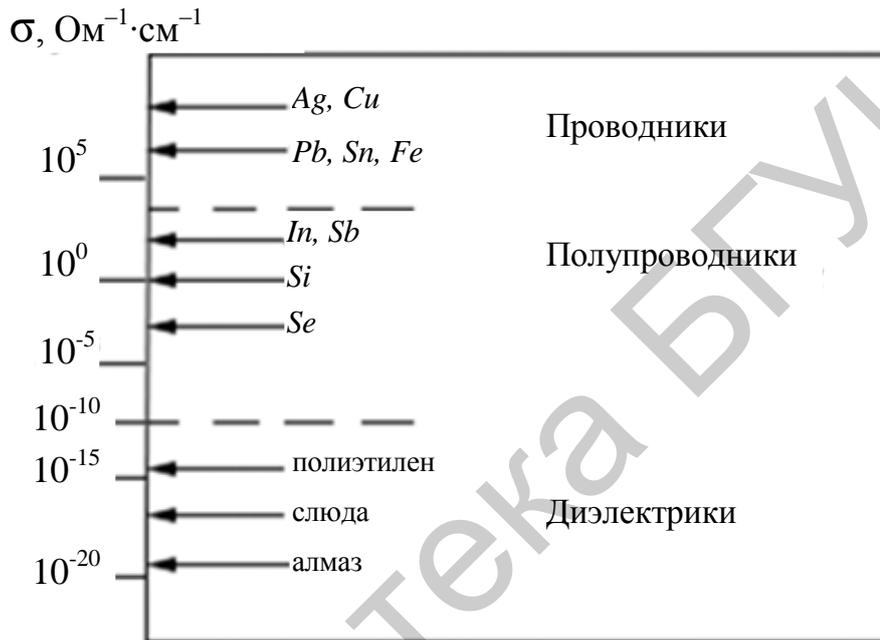


Рисунок 3.2 – Расположение материалов по удельной проводимости

Из рисунка 3.2 видно, что электропроводность различных веществ изменяется в очень широких пределах. Более того, одно и то же твердое тело в зависимости от содержания в нем примесей или дефектов может иметь различную проводимость.

Анализ показывает, что при переходе от одной группы веществ к другой значение электропроводности может перекрываться, поэтому классификация твердых тел по величине электропроводности не является совершенной и однозначной. Различие между металлами, полупроводниками и диэлектриками проявляется достаточно четко в ходе исследования температурных зависимостей электропроводности. Практически любой из материалов обладает сопротивлением. Сопротивление – результат взаимодействия носителей заряда с ионами решетки, но это взаимодействие чаще всего не механическое. Исходя из совре-

менных представлений, можно сказать, что сопротивление – результат взаимодействия носителей заряда с фононами кристаллической решетки.

Фонон – квазичастица, соответствующая тепловым или звуковым колебаниям кристаллической решетки.

Характеризовать материал, исходя из сопротивления, недостаточно, потому что данная величина зависит от различных факторов. Лучшей характеристикой считается удельное сопротивление.

Удельным сопротивлением называется сопротивление образца в форме куба с длиной ребра 1 м, если ток протекает от одной грани к противоположной при нормальных условиях (например, от грани AA_1B_1B к грани DD_1C_1C по кратчайшему пути), т. е. при давлении 760 мм рт. ст., температуре порядка $27\text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности 70 % (рисунок 3.3).

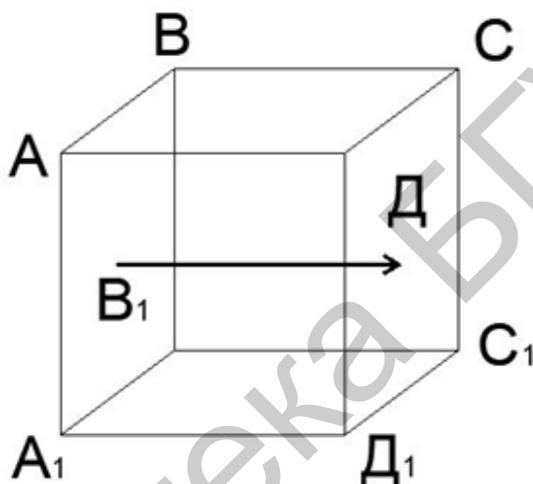


Рисунок 3.3 – Протекание тока от плоскости AA_1B_1B к DD_1C_1C

Удельное сопротивление ρ зависит от рода вещества, примесей, температуры. Связь между сопротивлением и удельным сопротивлением следующая:

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

где R – электрическое сопротивление, Ом;

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

L – длина образца, м;

S – площадь сечения образца, м^2 .

С 1985 г. в систему СИ для измерения больших значений сопротивления введена новая единица сопротивления R_k – Клитцинг, равная

$$R_k = \frac{h}{ne^2},$$

где h – постоянная Планка, Дж·с;

$n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число;

e – заряд электрона, Кл.

Данные экспериментов свидетельствуют, что электропроводность металлов значительно зависит от температуры:

$$R_1 = R_0(1 + \alpha\Delta t) \text{ или } \rho_t = \rho_0(1 + \alpha\Delta t),$$

где R_1 – сопротивление образца при температуре нагрева, Ом;

R_0 – сопротивление образца при начальной температуре, Ом;

α – температурный коэффициент сопротивления, который зависит от рода материала и температуры, К;

Δt – разность температур нагрева, К;

ρ_t – удельное сопротивление образца при температуре нагрева, Ом·см;

ρ_0 – удельное сопротивление при начальной температуре, Ом·см.

Связь между удельным сопротивлением и сопротивлением образца следующая:

$$\rho = \frac{S \cdot R}{L},$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом·м;

S – площадь сечения образца, м²;

R – сопротивление образца, Ом;

L – длина образца, м.

В микроэлектронике используется величина, обратная удельному сопротивлению $1/\rho$, называемая удельной проводимостью, которую далее будем называть просто проводимостью и обозначать буквой σ , Ом⁻¹·м⁻¹:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

С понижением температуры до области криогенной наступает явление, когда сопротивление практически падает скачком до нуля (рисунок 3.4).

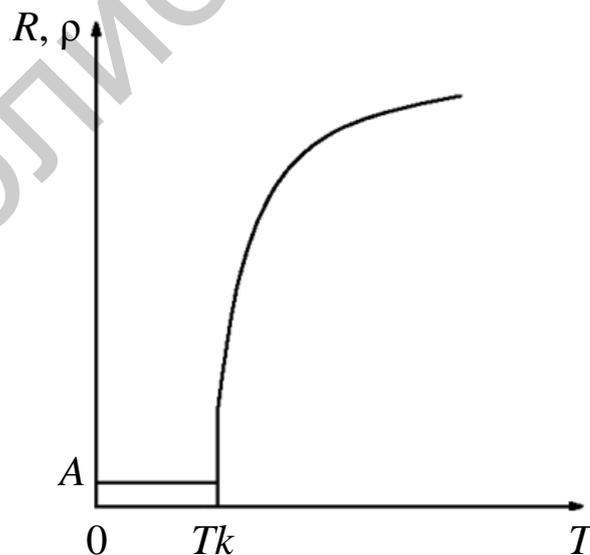


Рисунок 3.4 – Зависимость удельного сопротивления от температуры

Отрезок $0A$ характеризует величину сопротивления, которая практически никогда не может быть равна 0 , потому что носит квантовый характер.

Отрезок $0T_k$ характеризует температуру, когда наступает резкое понижение удельного сопротивления (сопротивления) – сверхпроводимость, и называется критической температурой.

Явление сверхпроводимости в 1911 г. обнаружил Омерлинг Оннес, а объяснили ученые Бардин, Купер, Шриффер (БКШ) в 1957 г. В основе их теории лежит представление, что между электронами металла могут действовать силы притяжения, возникающие вследствие поляризации кристаллической решетки.

Анализ углового коэффициента наклона кривой, изображенной на рисунке 3.4, в разных точках характеризует зависимость температурного коэффициента удельного сопротивления α от температуры. Зависимость $\alpha = f(T)$ можно выразить гистограммой, приведенной на рисунке 3.5.

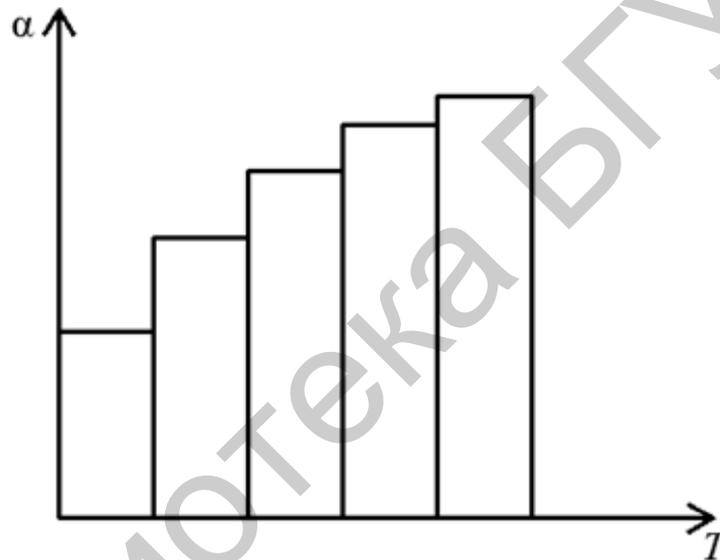


Рисунок 3.5 – Гистограмма зависимости температурного коэффициента α от температуры T

В настоящее время сверхпроводимость обнаружена и в металлических сплавах, критическая температура которых составляет от сотых долей до десяти градусов Кельвина. До 1986 г. наиболее высокотемпературным сверхпроводником оставался Nb_3 , имеющий $T_k = 23,4$ К. К настоящему времени твердо установлено, что в системе $Tl - Ba - Ca - Si - O$ наблюдается переход при температуре 125 К. Характерно, что высокотемпературными сверхпроводниками являются не металлические соединения, а оксиды, обладающие в нормальном состоянии низкой электропроводностью. В настоящее время в литературе появилась информация об обнаружении сверхпроводимости керамики при $T_k = 168, 180, 240$ К. Эта сверхпроводимость высокотемпературная.

Для изучения зависимости сопротивления от температуры нужны цифровой вольтметр и термостат (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Внешний вид передней панели термостата и вольтметра

3.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя образец.
- 2 Подсоединить исследуемый образец к клеммам крышки термостата с внутренней стороны.
- 3 Вход цифрового вольтметра (измерение сопротивления) подсоединить к клеммам термостата. Включить вилки приборов в сеть. Включить тумблер СЕТЬ.
- 4 Ручкой термостата выставить нужную температуру нагрева.
- 5 При данной температуре произвести измерение сопротивления образца 12 раз.
- 6 Данные измерений записать в таблицу 3.1.
- 7 После выполнения работы разобрать электрическую цепь, убрать рабочее место.
- 8 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

3.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа №__

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

3.7 Контрольные вопросы и задания

1 Что такое сопротивление? Единицы измерения сопротивления.

2 Что такое удельная проводимость? Единицы измерения удельной проводимости.

3 Физический смысл температурного коэффициента удельного сопротивления α .

4 Что такое удельное сопротивление?

5 Что такое сверхпроводимость?

6 Что такое фонон?

7 Как температура влияет на проводимость проводников?

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №4

Определение удельного сопротивления полупроводников

4.1 Цель работы

Приобрести навыки определения удельного сопротивления полупроводниковых материалов.

4.2 Задание

1 Для каждого метода измерения удельного сопротивления собрать соответствующую схему (рисунки 4.2–4.5).

2 Произвести измерения и заполнить таблицы 4.1–4.4.

3 Выполнить вычисления и заполнить таблицы 4.1–4.4.

4 Подготовить отчет о работе, в котором привести заполненные таблицы 4.1–4.4, формулы и вычисления по ним.

5 Сделать выводы по работе.

Таблица 4.1

Номер опыта	Номер образца	$U, В$	$I, А$	$\rho, Ом\cdot м$
1 ...				
12				

Таблица 4.2

Номер опыта	$U, В$	$I, А$	$S, м^2$	$L, м$	$\rho, Ом\cdot м$
1 ...					
12					

Таблица 4.3

Номер опыта	$U, В$	$I, А$	$L, м$	$\rho, Ом\cdot м$	$\rho_{ср}, Ом\cdot м$
1 ...					
12					

Таблица 4.4

Номер опыта	$U, В$	$I, А$	$L_1, м$	$L_2, м$	$L_3, м$	$\rho, Ом\cdot м$	$\rho_{ср}, Ом\cdot м$
1 ...							
12							

4.3 Оснащение работы

Макет, образец, микроскоп или измерительная лупа, амперметр, вольтметр, измерительные мосты (потенциометры).

4.4 Основные теоретические сведения

Физические свойства полупроводниковых материалов характеризуются прежде всего концентрацией примесей и степенью совершенства кристаллической решетки полупроводника.

К самым важным параметрам относятся:

- удельное сопротивление ρ , которое определяется количеством легирующих примесей, зависит от подвижности носителей заряда и температуры;
- тип проводимости;
- время жизни неравновесных носителей заряда, которое является мерой концентрации центров рекомбинации в объеме полупроводника;
- подвижность носителей заряда, которая определяется как скорость движения носителей заряда в электрическом поле единичной напряженности;
- ориентация монокристаллов;
- плотность дислокаций и др.

В системе СИ под удельным сопротивлением понимают сопротивление, которым обладает образец в форме куба с длиной ребра в 1 м, если ток протекает от одной грани к противоположной при нормальных условиях. Единица измерения удельного сопротивления в системе СИ – ом-метр (Ом·м).

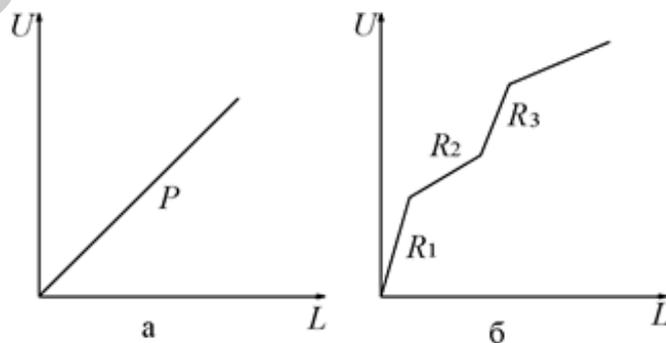
Для определения удельного сопротивления полупроводниковых материалов применяют следующие методы: компенсационный двух-, трех-, четырехзондовый, конденсаторный, индуктивный.

Недостатки названных методов:

- при измерении удельного сопротивления всегда существует градиент температуры вдоль образца, который вызывает появление термоЭДС на измерительных зондах, и определяется величиной протекающего тока и временем эксперимента;

- образцы полупроводников обладают неоднородностью распределения примесей вдоль их длины и, следовательно, имеют неоднородное электрическое сопротивление (рисунок 4.1);

- компенсационный метод не устраняет влияние переходных сопротивлений между границами отдельных кристаллических зерен, из которых состоит поликристаллический образец.



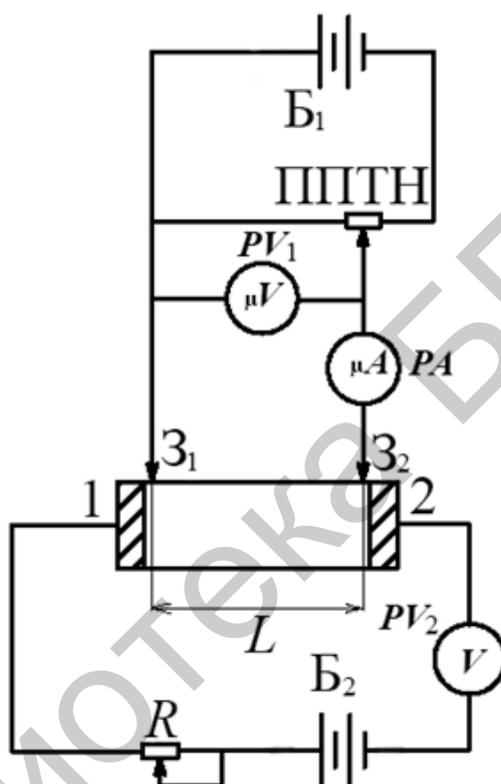
а – однородное электрическое поле; б – неоднородное электрическое поле

Рисунок 4.1 – Распределение потенциала в образцах

4.4.1 Измерение удельного сопротивления полупроводника компенсационным методом

При измерении удельного сопротивления полупроводников основными источниками ошибок являются переходное сопротивление и термоЭДС. Поэтому при определении удельного сопротивления эти явления должны устраняться, что достигается компенсационным методом.

Принципиальная схема компенсационного метода измерения удельного сопротивления полупроводника приведена на рисунке 4.2.



$ПШТН$ – потенциометр постоянного тока низкоомный; B_1, B_2 – источники тока;
 Z_1, Z_2 – зонды; 1, 2 – омические контакты; L – расстояние между зондами;
 R – переменный резистор (реостат)

Рисунок 4.2 – Определение удельного сопротивления полупроводника компенсационным методом

В этом случае от батареи B_2 с помощью контактов 1 и 2 к полупроводнику подводится ток. К образцу прижаты два измерительных зонда (Z_1 и Z_2) на расстоянии L . Разность потенциалов между ними измеряется потенциометром.

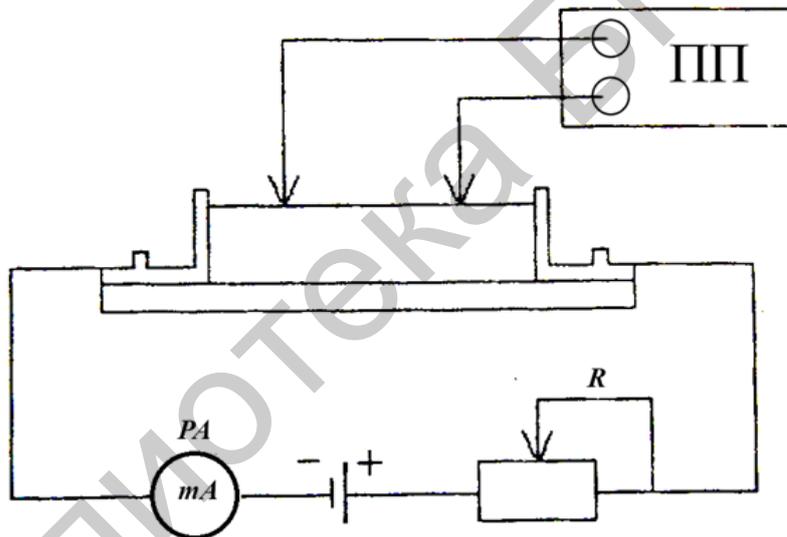
При поперечном сечении образца его удельное сопротивление ρ , Ом·м, равно

$$\rho = \frac{U \cdot S}{I \cdot L},$$

где U – падение напряжения на образце, В;
 S – площадь сечения образца, м²;
 I – ток, протекающий через образец, А;
 L – расстояние между зондами, м.

4.4.2 Измерение удельного сопротивления полупроводника двухзондовым методом

Двухзондовый метод применяется, как правило, для измерения удельного сопротивления на монокристаллах кремния, полученных методом плавающей зоны, которые имеют симметричную форму, дающую возможность рассчитать поверхность сечения по измеренному диаметру монокристалла. Измерения проводятся через каждые 0,5...1 мм по всей длине образца (см. рисунок 4.3).



ПП – потенциометр постоянного тока;
 R – переменный резистор (реостат)

Рисунок 4.3 – Измерение удельного сопротивления полупроводниковых материалов двухзондовым методом

Удельное сопротивление ρ , Ом·м, рассчитывается по формулам:

$$\rho = R \frac{S}{L}, \quad R = \frac{U}{I},$$

где R – сопротивление, Ом;
 S – площадь сечения образца, м²;
 L – расстояние между зондами, м;
 U – падение напряжения на образце, В;
 I – ток, протекающий через образец, А.

4.4.3 Измерение удельного сопротивления полупроводника трехзондовым методом

Трехзондовый метод часто применяют для измерения удельного сопротивления полупроводниковых пластин, сечения которых, как правило, ассиметричны (см. рисунок 4.4).

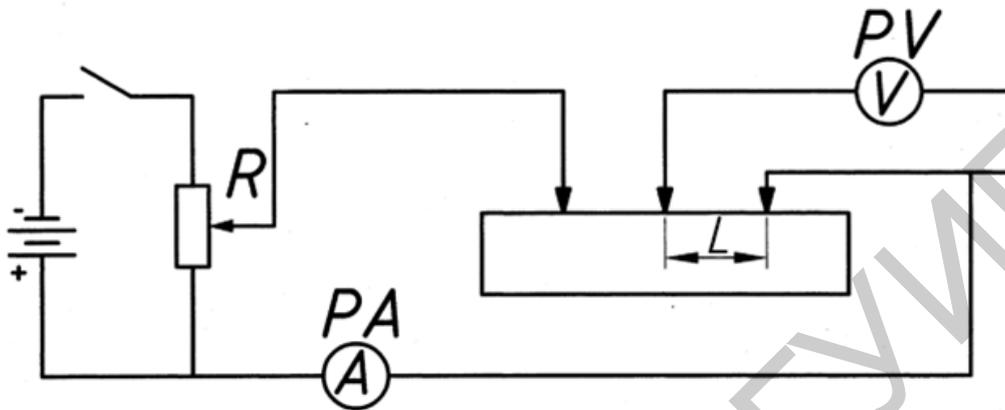


Рисунок 4.4 – Измерение удельного сопротивления полупроводниковых материалов трехзондовым методом

Удельное сопротивление определяется по формуле

$$\rho = \frac{U}{I} L.$$

4.4.4 Измерение удельного сопротивления полупроводника четырехзондовым методом

Четырехзондовый метод часто применяется для измерения удельного сопротивления ρ на монокристаллах германия, сечения которых, как правило, ассиметричны. При четырехзондовом методе измерения различают два случая:

- 1) расстояние между зондами неодинаково (см. рисунок 4.5);
- 2) расстояния между зондами равны.

В первом случае справедливо равенство

$$\rho = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}} \frac{2\pi}{\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1 + L_2} - \frac{1}{L_3 + L_4}},$$

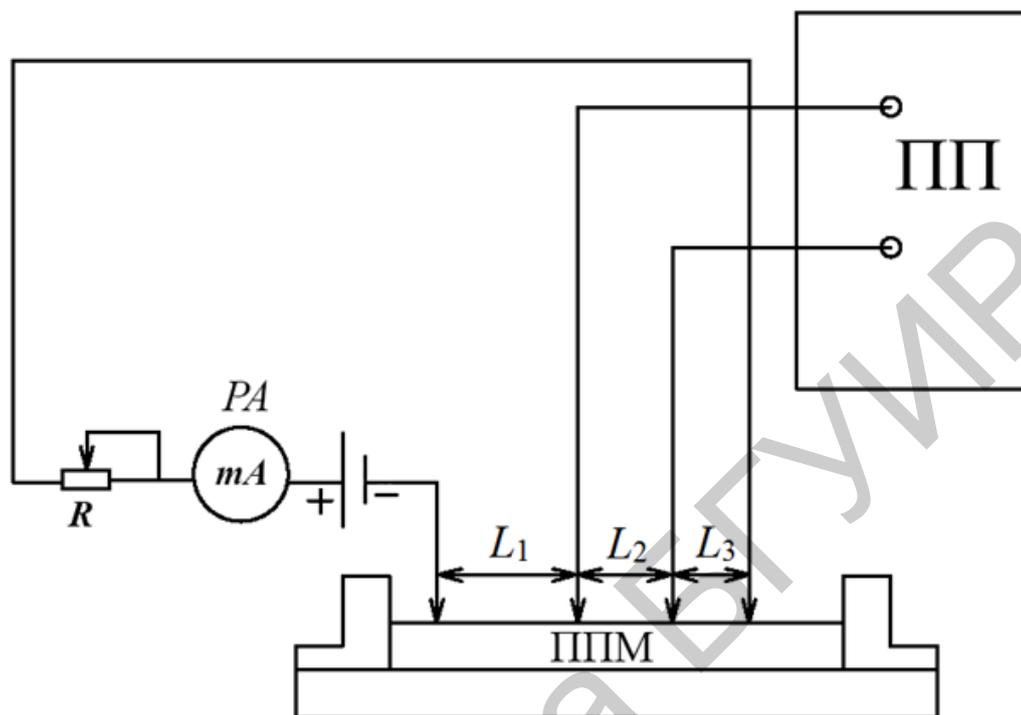
где $U_{\text{обр}}$ – падение напряжения на образце между средними зондами, В;

$I_{\text{обр}}$ – ток, протекающий через образец, А;

L_1, L_2, L_3 – расстояния между зондами, м.

В случае когда $L_1 = L_2 = L_3$, формула примет вид

$$\rho = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}} 2\pi L.$$



ПП – потенциометр постоянного тока; ППМ – полупроводниковый материал;
 R – переменный резистор (реостат); PA – миллиамперметр

Рисунок 4.5 – Измерение удельного сопротивления полупроводниковых материалов четырехзондовым методом

Падение напряжения на образцах и эталонных сопротивлениях находят с помощью потенциометра, расстояния L_1 , L_2 , L_3 – с помощью измерительного микроскопа или измерительной лупы, $I_{\text{обр}}$ – из падения напряжения на эталонном сопротивлении.

Тогда

$$\rho = R_{\text{эт}} \frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{эт}}} 2\pi L,$$

где $R_{\text{эт}}$ – эталонное сопротивление, Ом;

$U_{\text{обр}}$ – падение напряжения на образце между средними зондами, В;

$U_{\text{эт}}$ – падение напряжения на эталонном сопротивлении, включенном последовательно в цепь крайних зондов, В;

L – расстояние между зондами, м.

В случае выхода из строя батарей можно использовать блок питания (рисунок 4.6).

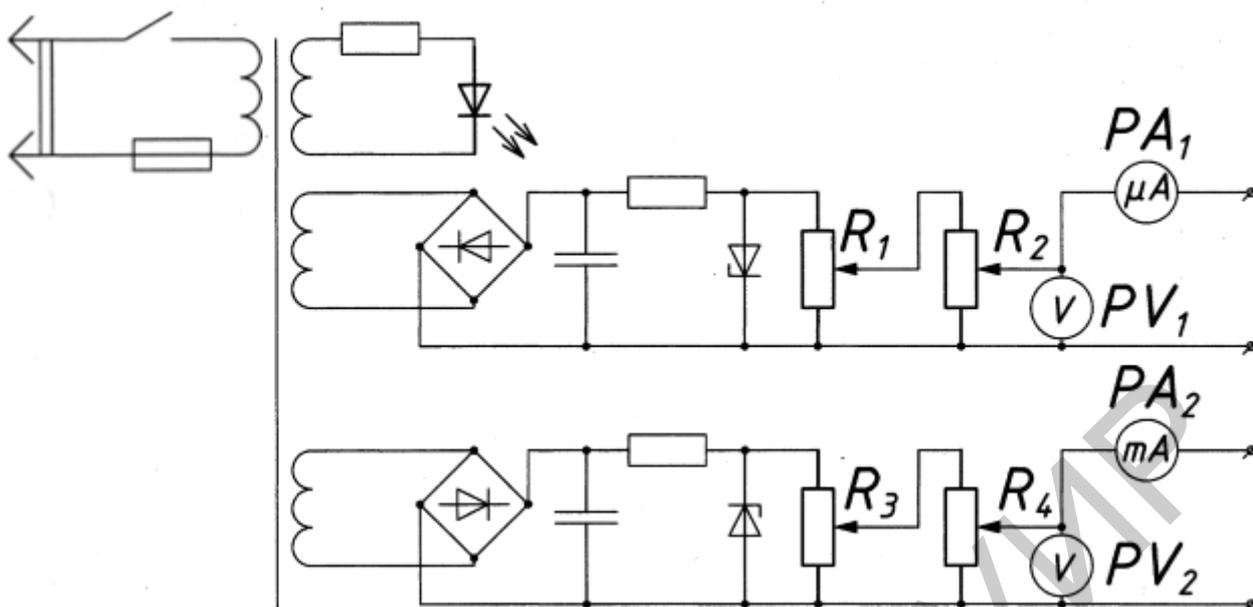


Рисунок 4.6 – Электрическая схема блока питания для замены электрических батарей и элементов в предыдущих схемах

4.5 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя образец и указание, каким методом определять удельное сопротивление.

2 Собрать электрическую цепь, соответствующую методу измерения удельного сопротивления (вместо батарей использовать блок питания постоянного напряжения). Приборы заземлить. Вилки приборов включить в сеть. Тумблеры приборов СЕТЬ включить.

3 Выполнить измерения, результаты внести в таблицы 4.1–4.4.

4 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

4.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа №__

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

4.7 Контрольные вопросы и задания

1 Способы измерения удельного сопротивления полупроводников.

2 Отличие в определении удельного сопротивления проводников и полупроводников.

3 Зависимость удельного сопротивления полупроводников от технологии изготовления.

4 Зависимость удельного сопротивления полупроводников от окружающей среды.

5 Влияние на численное значение удельного сопротивления полупроводника величины электрического тока, протекающего при эксперименте, и времени эксперимента.

6 Влияние удельного сопротивления полупроводниковых материалов на параметры полупроводниковых приборов.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №5

Исследование зависимости электропроводимости полупроводников от температуры

5.1 Цель работы

Приобрести навыки снятия зависимости электропроводимости полупроводниковых материалов от температуры.

5.2 Задание

1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, применяемыми в работе, изучить их технические данные.

2 Собрать электрическую цепь согласно рисунку 5.1.

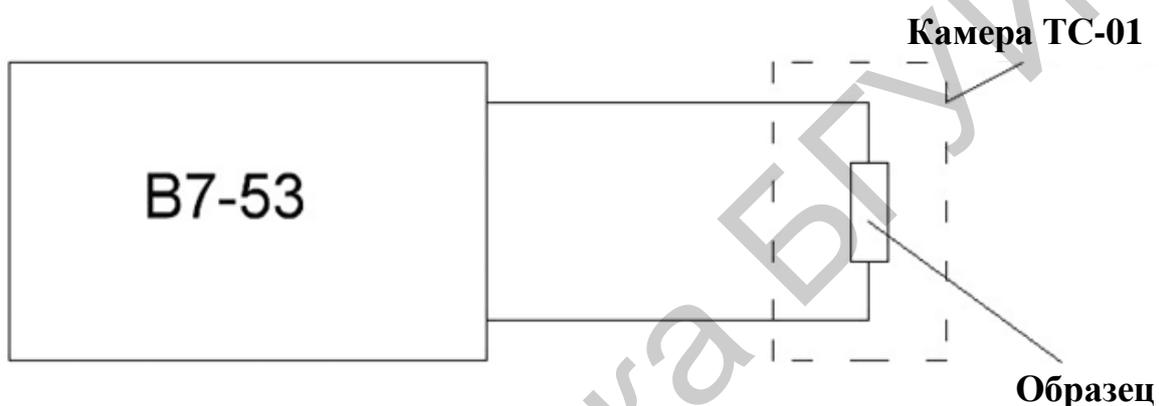


Рисунок 5.1 – Структурная схема макета

3 Измерить линейные размеры образца, выданного преподавателем, и сопротивление.

4 Измерять сопротивление образца через каждые 5...10 °С изменения температуры камеры термостата.

5 Данные эксперимента записать в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Номер опыта	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$R_0, \text{ Ом}$	$l, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$R_t, \text{ Ом}$	$\rho_0, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_t, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\sigma_0, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$	$\sigma_t, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$
1 ...										
12										

6 Начертить графики зависимостей $R = f(t)$, $\rho = f(t)$, $\sigma = f(t)$.

5.3 Оснащение работы

Мост постоянного или переменного тока, цифровой вольтметр типа В7-53, соединительные провода, штангенциркуль, измерительный микроскоп типа МИР-2, набор образцов, термостат ТС-01.

5.4 Основные теоретические сведения

К полупроводникам относится большой класс веществ. Полупроводники подразделяются на простые (элементарные) и сложные (полупроводниковые соединения).

Одной из основных характеристик полупроводниковых материалов может быть удельное сопротивление или удельная проводимость. Удельное сопротивление – сопротивление образца в форме куба с длиной ребра 1 м при нормальных условиях, если ток протекает от одной грани к противоположной. Удельное сопротивление полупроводниковых материалов зависит от рода материала, примесей, корпускулярных и электромагнитных излучений, температуры.

Существует связь между сопротивлением и удельным сопротивлением ρ , Ом·м:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L},$$

где R – сопротивление образца, Ом;

S – площадь сечения образца, м²;

L – длина образца, м.

В физике полупроводников часто пользуются величиной, обратной удельному сопротивлению, т. е. удельной проводимостью σ , Ом⁻¹·м⁻¹:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

На практике для определения зависимостей $R = f(t)$, $\rho = f(t)$ и $\sigma = f(t)$ для полупроводниковых материалов с определенной долей достоверности используется соотношение

$$R_t = R_0(1 - \alpha \Delta t),$$

где R_t – сопротивление образца при температуре нагрева, Ом;

R_0 – сопротивление образца при начальной температуре, Ом;

α – температурный коэффициент сопротивления, который зависит от рода материала и температуры, К⁻¹;

Δt – разность температур нагрева, К.

Уменьшение сопротивления полупроводника происходит за счет термогенерации, т. е. увеличения концентрации электронов и дырок.

Графическая зависимость сопротивления и удельного сопротивления полупроводников от температуры показана на рисунке 5.2, т. е. $R = f(T)$, потому что имеет место отрицательный температурный коэффициент сопротивления и удельного сопротивления.

Известна специальная формула зависимости проводимости полупроводниковых материалов от температуры:

$$\sigma_t = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2KT}},$$

где σ_t – проводимость при температуре нагрева, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$;
 σ_0 – первоначальное значение проводимости, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$;
 e – основание натурального логарифма (безразмерная величина);
 ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводникового материала, Дж;
 K – постоянная Больцмана, Дж/К;
 T – температура нагрева образца, К.

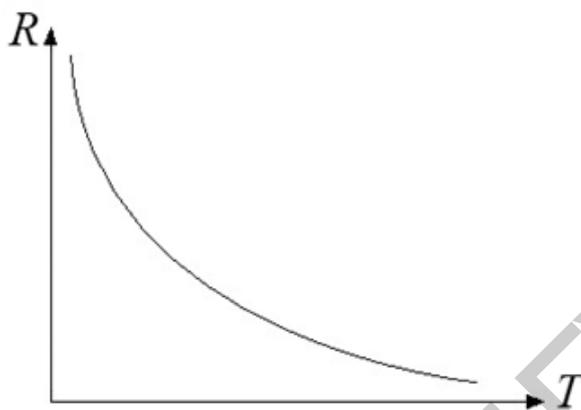


Рисунок 5.2 – График зависимости сопротивления полупроводников от температуры

Зависимость проводимости полупроводниковых материалов от температуры показана на рисунке 5.3 (зависимость $\ln\sigma = f(1/T)$).

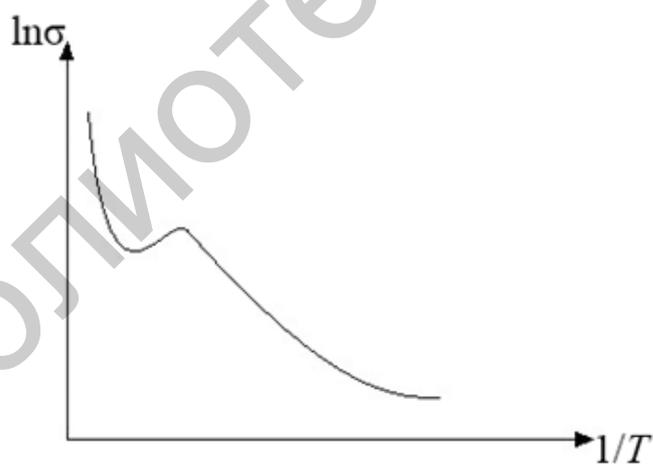


Рисунок 5.3 – График зависимости проводимости полупроводников от температуры

5.5 Порядок выполнения работы

1 Подсоединить исследуемый образец к клеммам крышки термостата с внутренней стороны.

2 Подсоединить выход клемм к измерительному мосту или цифровому вольтметру. Включить вилки приборов в сеть. Включить тумблер СЕТЬ.

3 Ручкой термостата задать нужную температуру нагрева.

4 Выбрать на измерительном мосту или вольтметре нужный предел измерения.

5 Выждать определенный промежуток времени, пока камера термостата нагреется до нужной температуры.

6 Сделать измерения и заполнить таблицу 5.1.

7 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

5.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

5.7 Контрольные вопросы и задания

1 Почему температура оказывает большее влияние на электропроводность полупроводника, чем проводника?

2 Что такое генерация и рекомбинация носителей тока?

3 От чего зависит концентрация носителей тока в полупроводниках?

4 Формулы электропроводности полупроводников.

5 Определение полупроводникового материала.

6 Что представляют собой простые и сложные полупроводники?

Лабораторная работа №6

Определение энергии ионизации (активации) примесей и ширины запрещенной зоны полупроводников

6.1 Цель работы

Изучить способы определения ширины запрещенной зоны на основании температурной зависимости электропроводности полупроводников.

6.2 Задание

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, макетом.
- 2 Собрать электрическую цепь согласно рисунку 5.1 (см. лабораторную работу №5).
- 3 Измерить линейные размеры образца, выданного преподавателем, и сопротивление.
- 4 Проводить измерения сопротивления образца через каждые 5...10 °C изменения температуры камеры термостата.
- 5 Данные измерений записать в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

Номер опыта	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	T^{-1}, K^{-1}	S, m^2	R, Om	$\sigma, \text{Om}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	α, K^{-1}	$\ln\sigma$	$\Delta E, \text{Дж}$
1...									
12									

6 Вычислить энергию активации по формуле (6.1).

7 Начертить график зависимости $\ln\sigma = f(T^{-1})$.

6.3 Оснащение работы

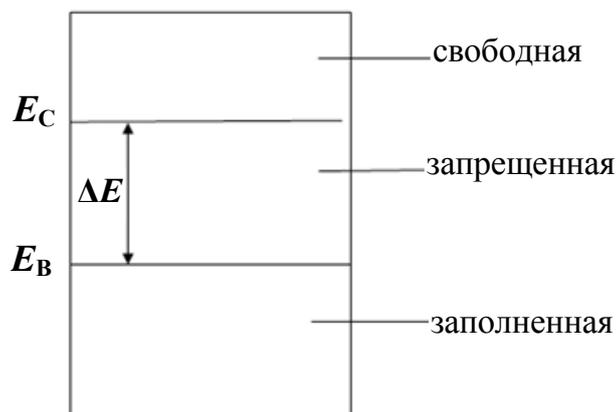
Мост постоянного или переменного тока или вольтметр типа В7-53, исследуемый образец, соединительные провода, микрометр или штангенциркуль, термостат ТС-01.

6.4 Основные теоретические сведения

Для объяснения явления проводимости часто пользуются зонной теорией твердых тел, согласно которой различают:

- зону проводимости, или свободную;
- запрещенную зону;
- заполненную, или валентную, зону.

Запрещенная зона – энергетическая щель, которая располагается между свободной и валентной зонами, характеризуется шириной запрещенной зоны и обозначается ΔE (рисунок 6.1).



E_C – энергетический уровень, отделяющий зону проводимости (свободную) от запрещенной; E_B – энергетический уровень, отделяющий запрещенную зону от валентной (заполненной)

Рисунок 6.1 – Наличие и расположение зон

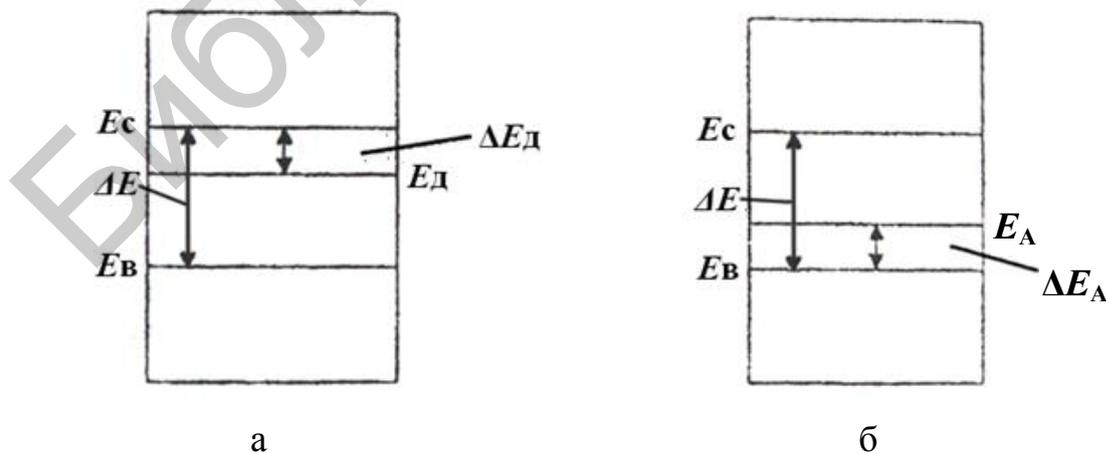
Энергетическая зона – совокупность энергетических уровней.

Энергетический уровень – линия на энергетической диаграмме, которой соответствует определенное значение энергии электрона. Энергетический разрешенный уровень – уровень, на котором может быть электрон; ему соответствует определенное значение энергии электрона. Энергетический запрещенный уровень – уровень, на котором не может находиться электрон; ему не соответствует значение энергии электрона.

Для различных полупроводниковых материалов ΔE имеет разное значение.

Иногда вместо понятия «ширина запрещенной зоны» применяют понятие «энергия активации». В случае примесей в полупроводниках различают энергию активации донорной примеси ΔE_D (рисунок 6.2, а) или акцепторной примеси ΔE_A (рисунок 6.2, б).

Вследствие малости величины энергии активации ΔE ее часто измеряют несистемной единицей электрон-вольт.



ΔE , ΔE_D , ΔE_A – энергия активации, Дж

Рисунок 6.2 – Энергетическая диаграмма примесных полупроводников

Связь между энергией активации и проводимостью собственного полупроводника устанавливает формула

$$\sigma_T = \sigma'' e^{\frac{-\Delta E_c}{2kT}},$$

а примесного полупроводника – формула

$$\sigma_T = \sigma'_0 e^{\frac{-\Delta E_{\text{прим}}}{2kT}} + \sigma''_0 e^{\frac{-\Delta E_{\text{собств}}}{2kT}}.$$

Проводимость примесного полупроводника состоит из двух составляющих σ_1 и σ_2 , из которых одна – собственная составляющая, а другая – примесная.

В зависимости от величины температуры одна составляющая может преобладать над другой. При низких температурах преобладает примесная проводимость над собственной, т. е.

$$\sigma_T = \sigma'_0 e^{\frac{-\Delta E_{\text{прим}}}{2kT}},$$

где σ'_0 – начальная проводимость, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

$e = 2,7$ – основание натурального логарифма, безразмерная величина;

$\Delta E_{\text{прим}}$ – энергия активации примесей, Дж;

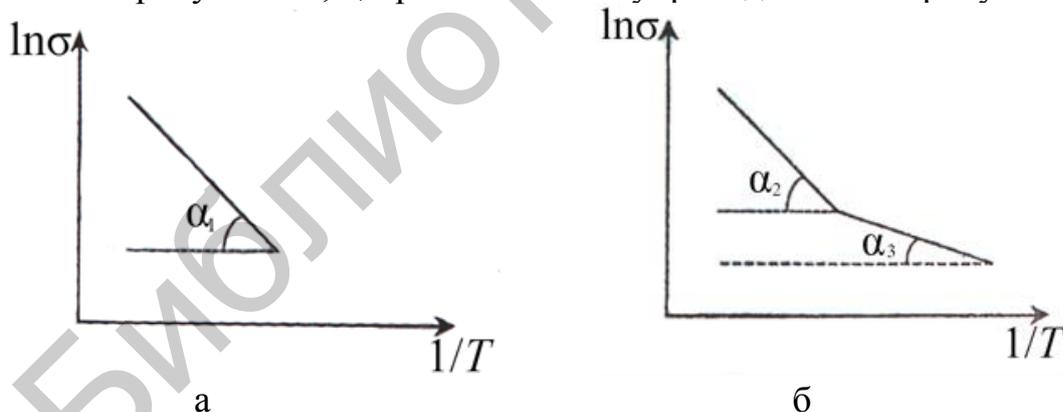
k – постоянная Больцмана, Дж/К.

При высоких температурах

$$\sigma_T = \sigma''_0 e^{\frac{\Delta E_{\text{собств}}}{2kT}},$$

где $\Delta E_{\text{собств}}$ – энергия активации собственного полупроводника, Дж.

Графическая зависимость собственного полупроводника $\ln \sigma = f(T^{-1})$ представлена на рисунке 6.4, а, примесного полупроводника – на рисунке 6.3, б.



а – собственный полупроводник; б – примесный полупроводник

Рисунок 6.3 – Графики зависимостей $\ln \sigma = f(1/T)$

Нетрудно доказать, математически анализируя графики (см. рисунок 6.3), что энергия активации полупроводника и примеси пропорциональна тангенсу угла наклона прямых, т. е.

$$\operatorname{tg}\alpha_1 \approx \Delta E_1, \operatorname{tg}\alpha_2 \approx \Delta E_2, \operatorname{tg}\alpha_3 \approx \Delta E_3.$$

Если сделать вычисления для двух значений примесной проводимости σ_1 и σ_2 при температурах T_1 и T_2 , отличающихся на единицы градусов, и предположить, что ΔE практически не изменится, то

$$\Delta E = 2k \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} (\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2). \quad (6.1)$$

Как показывает теория и практика, $\Delta E = f(t)$, а именно

$$\Delta E_t = \Delta E_0 - \alpha \Delta T,$$

где ΔE_t – ширина запрещенной зоны нагретого полупроводника, Дж;

ΔE_0 – первоначальное значение ширины запрещенной зоны, Дж;

α – температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны, Дж/К;

ΔT – разность температуры нагрева, К.

Графически эта зависимость имеет вид, изображенный на рисунке 6.4.

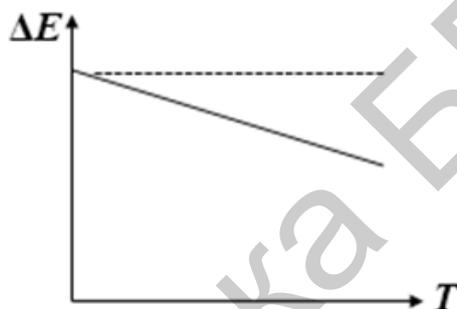


Рисунок 6.4 – График зависимости ширины запрещенной зоны от температуры

6.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить образец, измерить его линейные размеры.
- 2 Подсоединить исследуемый образец к клеммам крышки термостата с внутренней стороны. Подсоединить выход клемм ТС-01 к измерительному мосту или цифровому вольтметру. Включить вилки приборов в сеть. Включить тумблеры приборов СЕТЬ. Ручкой термостата задавать нужную температуру нагрева.
- 3 Выбрать на измерительном приборе (мосту или вольтметре) нужный предел измерений.
- 4 Подождать определенный промежуток времени, пока камера термостата нагреется до нужной температуры.
- 5 Выполнить измерения и заполнить таблицу 6.1.
- 6 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

6.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа №__

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

6.7 Контрольные вопросы и задания

1 Что такое энергетическая зона?

2 Охарактеризуйте типы зон.

3 От чего зависит ширина запрещенной зоны и каким образом?

4 Что представляют собой бесщелевые полупроводники?

5 Что представляют собой разрешенные и запрещенные энергетические уровни и зоны?

6 Что такое примесные энергетические уровни?

7 Что представляет собой энергия активации примесей?

Лабораторная работа №7

Исследование зависимости сопротивления полупроводников от света (фотопроводимость)

7.1 Цель работы

Изучить зависимость сопротивления (удельной проводимости) полупроводников от света (освещенности).

7.2 Задание

1 Освоить навыки пользования измерительными приборами и макетом, знать их технические данные.

2 Изучить электрическую схему макета (рисунок 7.1).

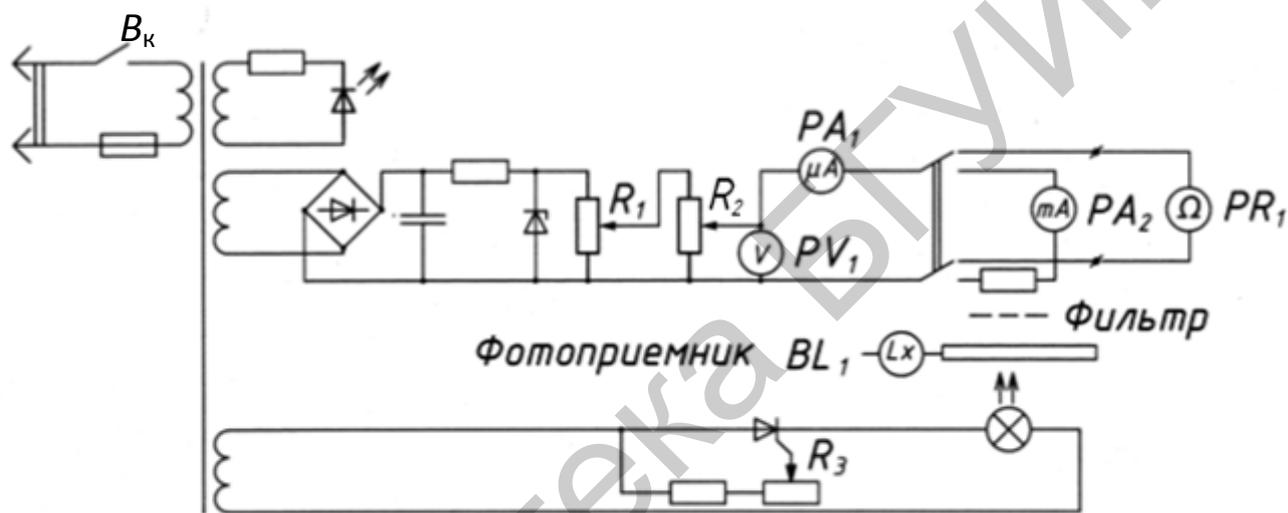


Рисунок 7.1 – Схема электрическая принципиальная макета для изучения фотопроводимости

3 Измерить линейные размеры образца, выданного преподавателем.

4 Вычислить площадь образца, на которую будет падать поток света.

5 Измерить сопротивление образца.

6 Вычислить проводимость.

7 Измерять сопротивление образца после каждого изменения светового потока с помощью резистора R_3 (освещенности образца) при разных светофильтрах.

8 Данные эксперимента записать в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

Номер опыта	U , В	I , А	R , Ом	l , м	r , м	S , м ²	ρ , Ом·м	E , лк	σ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	Цвет светофильтра
1...										
12										

С помощью резистора R_3 произвольно установить величину освещенности образца. Устанавливая различные светофильтры при $E = \text{const}$, произвести измерения сопротивления (проводимости). Данные измерений записать в таблицу 7.2. Необходимо помнить, что каждому цвету излучения соответствует своя длина волны.

Таблица 7.2

Номер опыта	Цвет светофильтра	U , В	I , А	R , Ом	σ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	λ , нм
1	Красный					620...650
2	Оранжевый					590...620
3	Желтый					560...590
4	Зеленый					500...560
5	Голубой					480...500
6	Синий					450...480
7	Фиолетовый					480...

9 Начертить графики зависимостей: $R = f(E)$ или $\sigma = f(E)$ – при разных светофильтрах; $R = f(\lambda)$ или $\sigma = f(\lambda)$.

7.3 Оснащение работы

Набор образцов, соединительные провода, источник света, регулируемый по яркости, люксметр типа Ю-16 (Ю-116), лабораторный макет.

7.4 Основные теоретические сведения

При попадании светового потока на образец могут произойти отражение, преломление, поглощение. В случае поглощения света каждый фотон сообщает энергию электрону, равную

$$\Delta E \approx h\nu,$$

где ΔE – энергия кванта, Дж;

h – постоянная Планка, Дж·с;

ν – частота, с⁻¹.

При попадании на полупроводник поглощаемого потока света происходит фотогенерация, процесс образования пар электрон – дырка (рисунок 7.2).

При этом увеличивается концентрация носителей тока, а следовательно, проводимость $\Delta\sigma$, Ом⁻¹·м⁻¹:

$$\Delta\sigma = \sigma_c - \sigma_t,$$

где σ_c – проводимость при падающем потоке света, Ом⁻¹·м⁻¹;

σ_t – проводимость темновая, Ом⁻¹·м⁻¹.

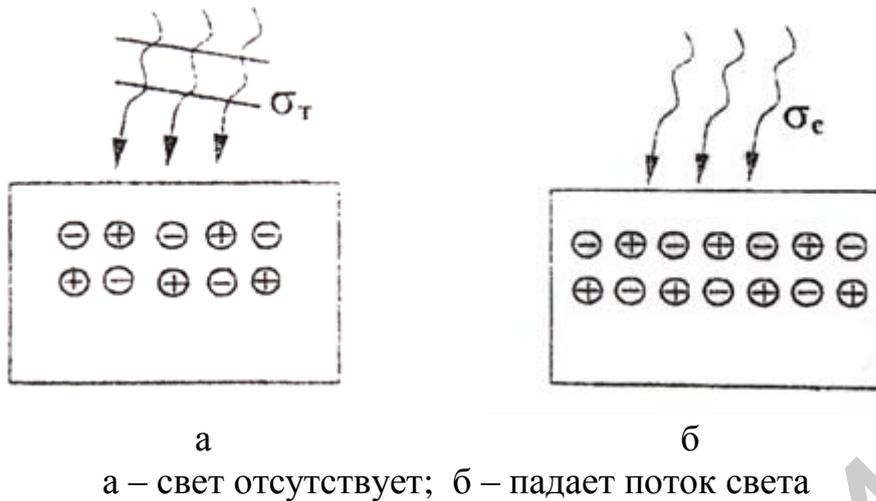


Рисунок 7.2 – Действие света

Чтобы происходил процесс фотогенерации, необходимо условие, при котором энергия падающего кванта света была бы как минимум равна или больше энергии активации полупроводника, т. е.

$$h\nu \geq \Delta E.$$

Из данного соотношения легко определить граничную частоту ν и длину волны λ , при которых будут наблюдаться фотогенерация и фотопроводимость:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h};$$

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu} = \frac{c \cdot h}{\Delta E},$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны, м/с;

T – период колебаний, с.

Красная граница фотопроводимости – максимальная длина волны, при которой наблюдается фотопроводимость, или минимальная частота, при которой наблюдается фотопроводимость.

Следовательно, при увеличении светового потока (освещенности) будет увеличиваться проводимость полупроводника, а сопротивление уменьшаться за счет фотогенерации:

$$\sigma = n_c \cdot e \cdot \mu_n + p_c \cdot e \cdot \mu_p,$$

где n_c и p_c – концентрации электронов и дырок после фотогенерации, м⁻³;

e – заряд, Кл;

μ_n и μ_p – подвижность электронов и дырок, м²/(В·с).

Световой поток и освещенность связаны формулой

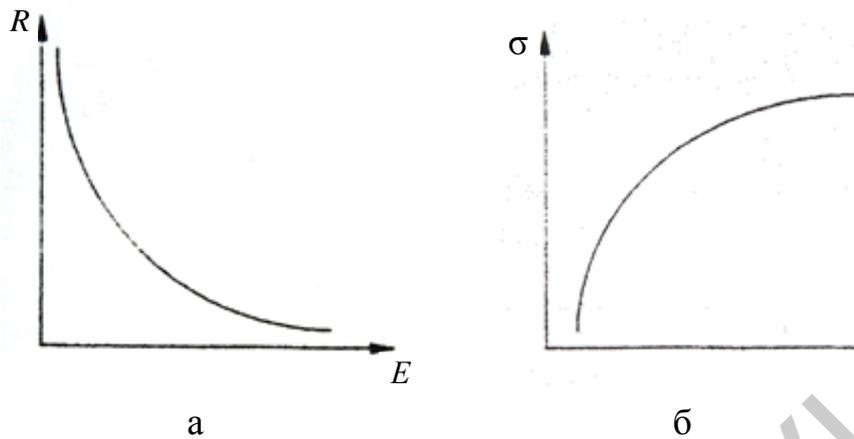
$$\Phi = E \cdot S,$$

где Φ – световой поток, лм;

E – освещенность, лк;

S – площадь образца освещения, м².

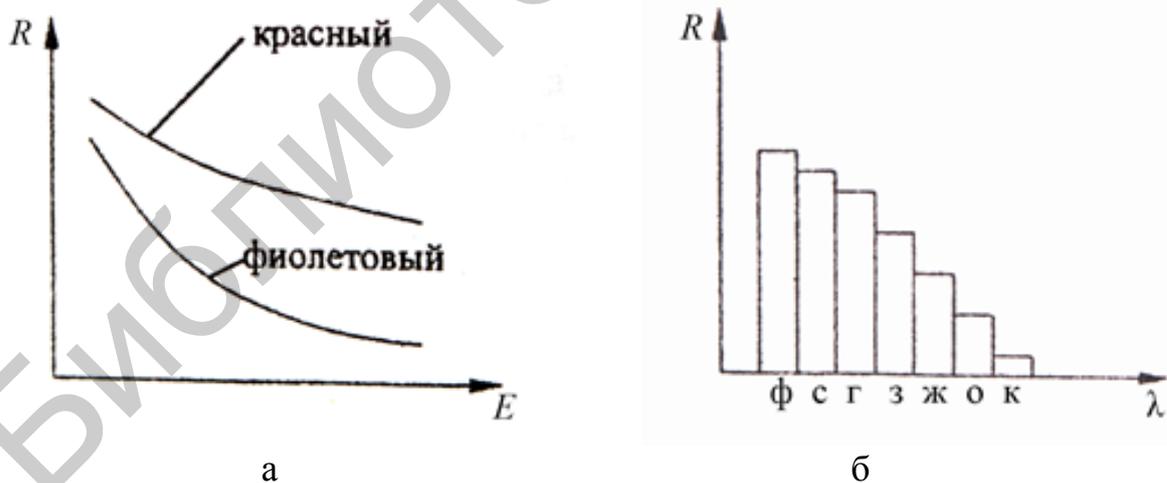
Если световой поток падает на образец и выполнено условие $h \cdot \nu \geq \Delta E_{\text{акт}}$, то сопротивление и проводимость изменяются (рисунок 7.3).



а – график зависимости сопротивления полупроводника от освещенности; б – график зависимости проводимости полупроводника от освещенности

Рисунок 7.3 – Графики зависимостей $R = f(E)$ и $\sigma = f(E)$

Проводимость и сопротивление образца будут зависеть не только от освещенности (рисунок 7.4, а), но и от частоты излучения, т. е. участка спектра или цвета излучения (рисунок 7.4, б).



а – при $R = f(E)$; б – при $R = f(\lambda)$

Рисунок 7.4 – Графики зависимостей

7.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя образец, измерить его линейные размеры.
- 2 Подсоединить исследуемый образец к клеммам макета (см. рисунок 7.1).

3 Подсоединить выход макета к измерительному мосту или цифровому вольтметру. Включить вилки приборов (макета и вольтметра) в сеть. Включить тумблер приборов СЕТЬ.

4 Ручкой накала (резистор R_3 на рисунке 7.1) установить нужную освещенность.

5 Ручками ГРУБО (резистор R_1) и ТОЧНО (резистор R_2) выставлять разные значения U , получая разные значения I .

6 Измерить люксметром освещенность.

7 Выбрать на приборах (измерительный мост, вольтметр, люксметр) нужные пределы измерения.

8 Если омметром измерять сопротивление образца, то необходимо отключить блок питания ключом B_k (см. рисунок 7.1).

9 Выполнить измерения и заполнить таблицы 7.1 и 7.2.

10 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

7.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа №__

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

7.7 Контрольные вопросы и задания

1 Что такое освещенность, световой поток?

2 Световая и темновая проводимость полупроводников.

3 Красная граница фотопроводимости полупроводников.

4 Что такое фотогенерация? Ее влияние на фотопроводимость.

5 Порядок работы с люксметром.

Лабораторная работа №8

Исследование зависимости ВАХ выпрямительных диодов от температуры

8.1 Цель работы

Изучить структуры активной части, конструкции и параметров диода; приобрести навыки практического определения зависимости ВАХ выпрямительных диодов от температуры.

8.2 Задание

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, макетом.
- 2 Изучить электрическую схему макета (рисунок 8.1).

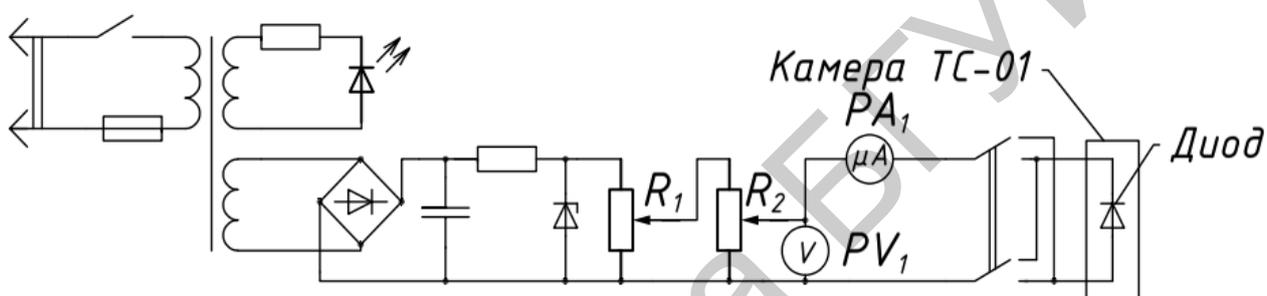


Рисунок 8.1 – Схема электрическая принципиальная макета для исследования ВАХ выпрямительных диодов от температуры

- 3 Записать паспортные данные исследуемого диода.
- 4 Изменяя значения напряжения ручками R_1 и R_2 , снять показания тока при прямом и обратном включении диода.
- 5 Выставить на термостате определенное значение температуры T_1 .
- 6 Снять показания тока при температуре T_2 .
- 7 Данные измерений записать в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

Номер опыта	$U_{пр}, В$	$I_{пр}, А$	$U_{обр}, В$	$I_{обр}, А$	$T_1, °С$	$T_2, °С$
1...						
12						

8.3 Оснащение работы

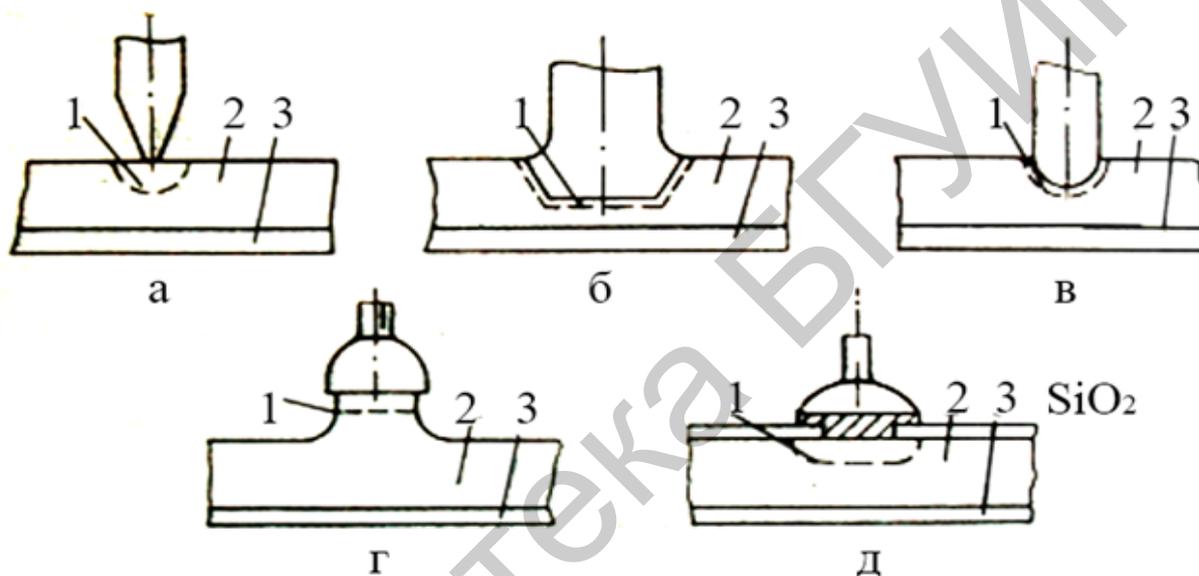
Набор диодов, лабораторный макет, термостат типа ТС-01, амперметр, вольтметр, соединительные провода.

8.4 Основные теоретические сведения

В первом приближении диод – полупроводниковый прибор, основу которого составляет выпрямляющий слой, образуемый на границе контактов металл – полупроводник, полупроводник – полупроводник.

Выпрямительный слой, возникающий на границе контакта металл – полупроводник, получил название барьера Шоттки. Выпрямительный слой, получаемый на границе контакта полупроводник – полупроводник, получил название *p-n*-перехода.

По технологии изготовления структуры диоды подразделяются на точечные, сплавные, сварные, диффузионные мезодиоды, планарные импульсные (рисунок 8.2).



а – точечные; б – сплавные; в – сварные;
г – диффузионные мезодиоды; д – планарные импульсные;
1 – *p-n*-переход; 2 – кристалл; 3 – омический контакт

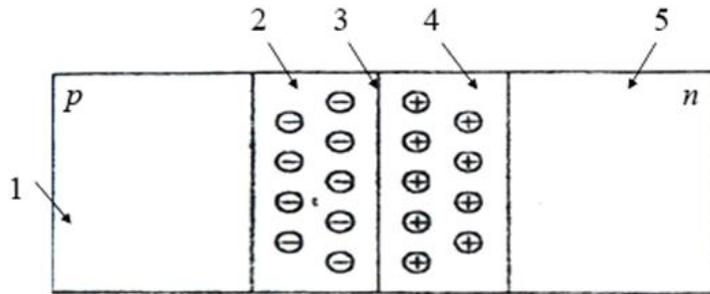
Рисунок 8.2 – Технология изготовления структуры диодов

P-n-переход – это технологический контакт двух полупроводников разного типа проводимости с образованием объемного заряда разных знаков по обе стороны границы контакта (рисунок 8.3).

P-n-переход характеризуется следующими параметрами:

- контактной разностью потенциалов;
- энергетической диаграммой;
- объемным зарядом;
- потенциальным барьером;
- напряженностью электрического поля;
- глубиной залегания объемного заряда;

- распределением концентрации основных и неосновных носителей заряда;
- плотностью объемного заряда;
- емкостью.



- 1 – полупроводник проводимости p -типа; 2 – объемный отрицательный заряд в p -полупроводнике; 3 – граница контакта p - и n -полупроводников; 4 – положительный объемный заряд в полупроводнике проводимости n -типа; 5 – полупроводник проводимости n -типа

Рисунок 8.3 – Структура p - n -перехода

P - n -переход обладает следующими свойствами:

- односторонней проводимостью;
- обратимым пробоем;
- свечением под действием протекаемого тока;
- изменением величины потенциального барьера под действием падающего на него потока света и т. д.

Характеристики p - n -перехода:

- вольт-амперная (ВАХ);
- вольт-фарадная.

ВАХ – это график зависимости тока, протекающего через диод (p - n -переход), от величины и знака приложенной разности потенциалов (рисунок 8.4).

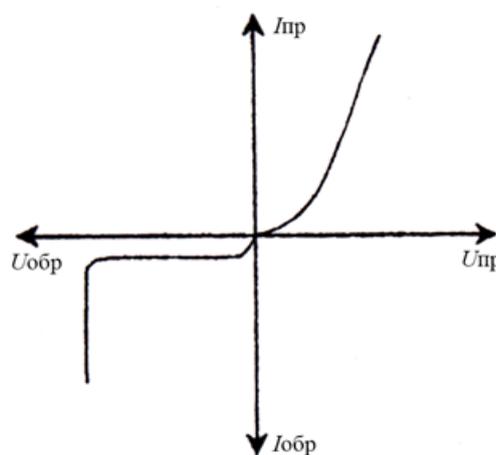
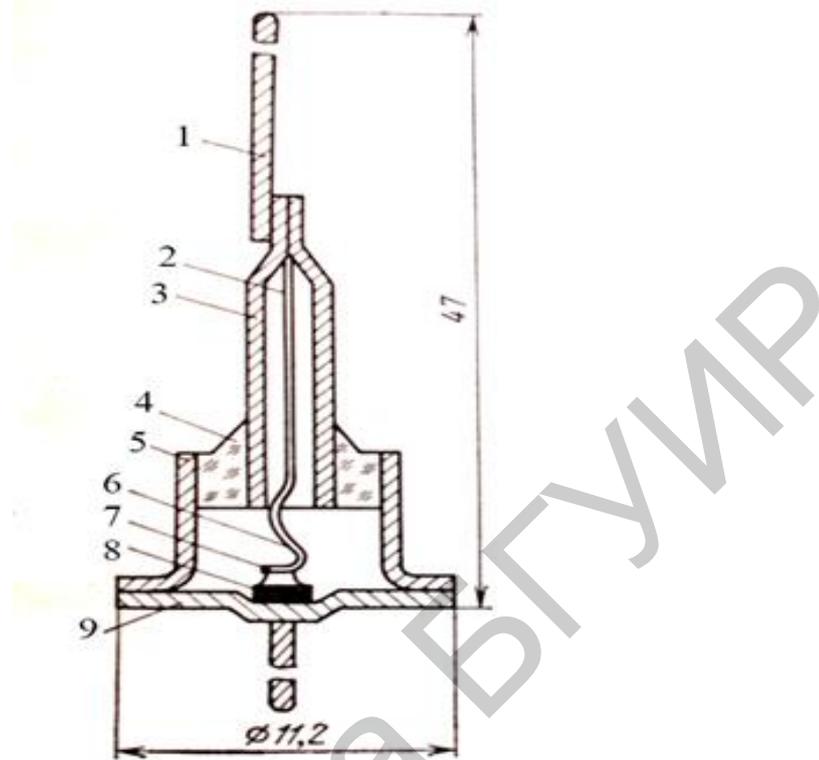


Рисунок 8.4 – Графическое изображение ВАХ p - n -перехода

Представим дискретный диод в виде $p-n$ -перехода с выводами помещенным в корпус одной из конструкций (рисунок 8.5).



- 1 – наружный вывод; 2 – внутренний вывод; 3 – трубка;
 4 – изолятор; 5 – корпус; 6 – контактная пружина;
 7 – кристалл полупроводника; 8 – припой; 9 – кристаллодержатель

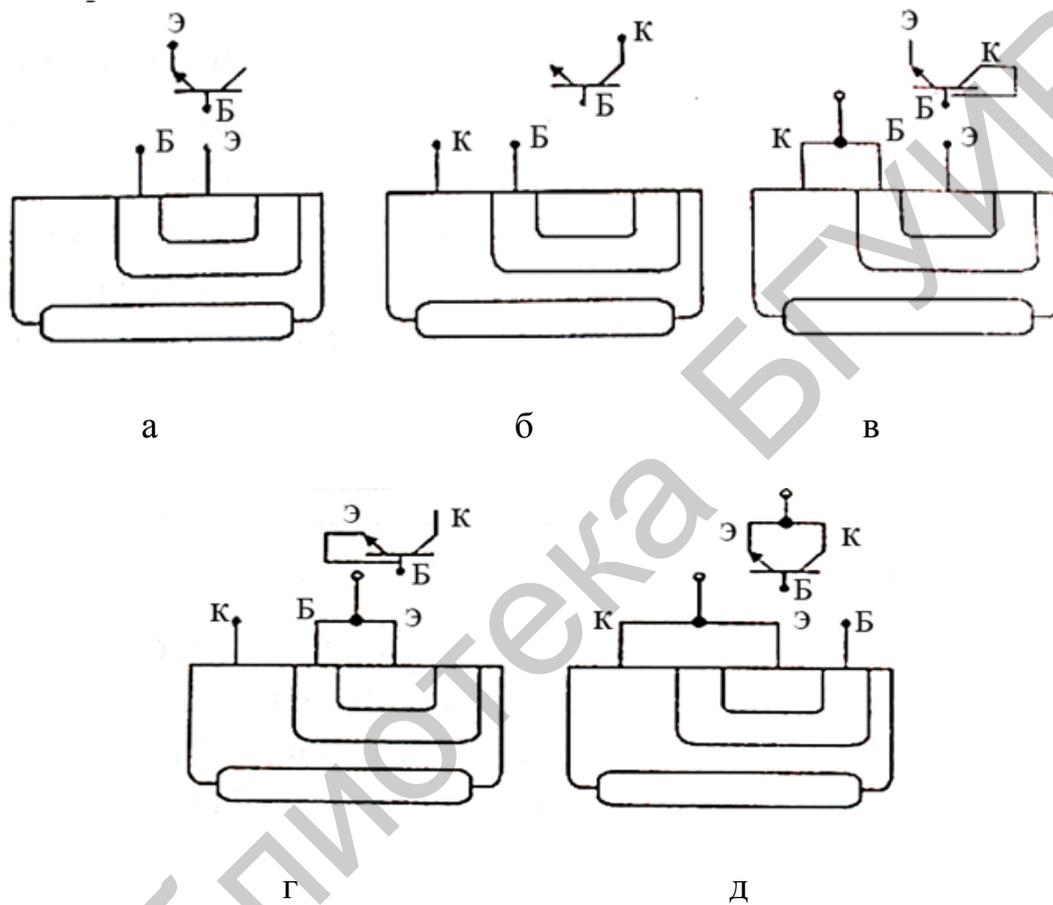
Рисунок 8.5 – Конструкция выпрямительного диода малой мощности

Существуют различные типы корпусов диодов. В паспортных данных на выпрямительные диоды указывают следующие параметры:

- прямое падение напряжения $U_{пр}$ – напряжение на диоде при протекающем через него установленном выпрямленном токе $I_{пр}$;
- наибольшее обратное напряжение $U_{обр\ max}$ – напряжение, которое может быть приложено к диоду в обратном направлении в течение длительного времени без опасности нарушения нормальной работы диода. Это напряжение обычно равно 80 % пробивного напряжения диода;
- наибольший обратный ток $I_{обр\ max}$ – ток через диод в обратном направлении при приложенном к нему $U_{обр\ max}$;
- наибольшая допустимая мощность рассеивания P_{max} – допустимое значение рассеиваемой мощности, при которой обеспечивается заданная надежность при длительной работе диода;
- диапазон частот Δf – полоса частот, в пределах которой выпрямленный ток диода не уменьшается ниже заданного уровня.

Как известно, биполярный транзистор имеет два $p-n$ -перехода, поэтому в качестве диода можно использовать любой из них или их комбинацию, при этом возможны пять вариантов включения транзистора: БК – Э, Б – Э, БЭ – К, Б – К, Б – ЭК. Здесь первым стоит обозначение одного вывода, вторым – обозначение другого вывода. Если два вывода соединены, их обозначения пишутся слитно.

В случае интегрального диода аналогично можно соединять активные области транзистора (рисунок 8.6).



а – Б – Э; б – Б – К; в – Э – БК; г – К – ЭБ; д – Б – ЭК

Рисунок 8.6 – Схематическое обозначение соединения выводов транзистора, используемого в качестве диода

Величина тока (плотность тока), протекающего через $p-n$ -переход, в зависимости от приложенной разности потенциалов выражается равенством

$$I = I_0 \left(e^{\pm \frac{qU}{kT}} - 1 \right),$$

где I_0 – первоначальное значение тока, протекающего через $n-p$ -переход, А;
 $e = 2,7$ – основание натурального логарифма, безразмерная величина;

q – величина заряда электрона, дырки, Кл;
 U – разность потенциалов, приложенная к p - n -переходу, В;
 k – постоянная Больцмана, Дж/К;
 T – температура p - n -перехода, К.

Известно, что

$$I_0 = i_0 \cdot S = \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) q \cdot S,$$

где i_0 – плотность электрического тока, А/м²;

S – площадь сечения p - n -перехода, м²;

D_p – коэффициент диффузии дырок, м²/с;

p_{n0} – концентрация дырок в области электронного полупроводника, м⁻³;

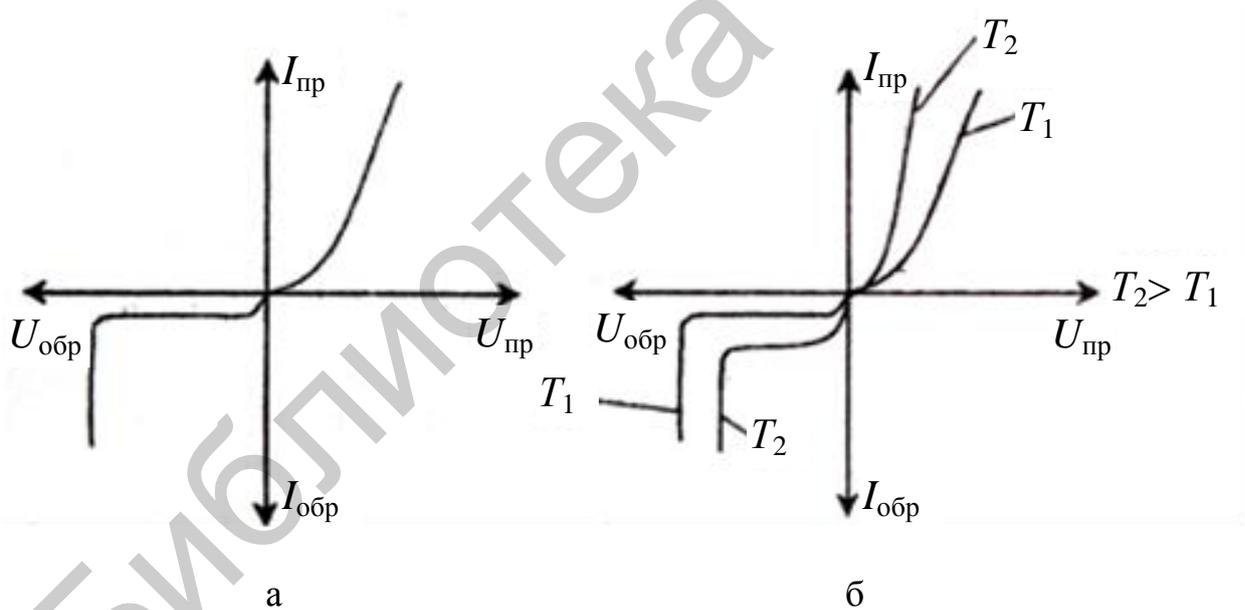
L_p – диффузионная длина дырок, м;

D_n – коэффициент диффузии электронов, м²/с;

n_{p0} – концентрация электронов в области дырочного полупроводника, м⁻³;

L_n – диффузионная длина электронов, м.

Как видно из равенства, величина электрического тока при $U = \text{const}$ зависит от температуры нагрева и изменяется за счет термогенерации носителей тока на границе контакта в области объемного заряда (рисунок 8.7).



а – при температуре T ; б – при температурах T_1 и T_2

Рисунок 8.7 – Виды ВАХ диода при различных температурах

8.5 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя диод, выписать из справочника его паспортные данные.

2 Подсоединить исследуемый диод к клеммам крышки термостата с внутренней стороны. Подсоединить выход клемм ТС-01 к макету. Заземлить приборы (ТС-01, макет). Включить вилки приборов в сеть. Включить тумблеры СЕТЬ.

3 Ручкой термостата задавать нужную температуру нагрева.

4 Выбрать на амперметре и вольтметре нужные пределы измерений.

5 Подождать, пока камера термостата нагреется до нужной температуры.

6 Выполнить измерения 12 раз при прямом и обратном включении диода, при постоянной температуре и заполнить таблицу 8.1.

7 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

8.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

8.7 Контрольные вопросы и задания

1 Что такое p - n -переход?

2 Основные характеристики p - n -перехода.

3 Основные свойства p - n -перехода.

4 Формула плотности тока при разных значениях U .

5 Зависимость ВАХ от температуры.

6 Область применения p - n -переходов.

Лабораторная работа №9

Определение контактной разности потенциалов на границе контакта металл – полупроводник

9.1 Цель работы

Приобрести навыки измерения и практического вычисления контактной разности потенциалов на границе контакта металл – полупроводник (М – ПП).

9.2 Задание

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, макетом.
- 2 Изучить структурную схему лабораторного макета (рисунок 9.1).

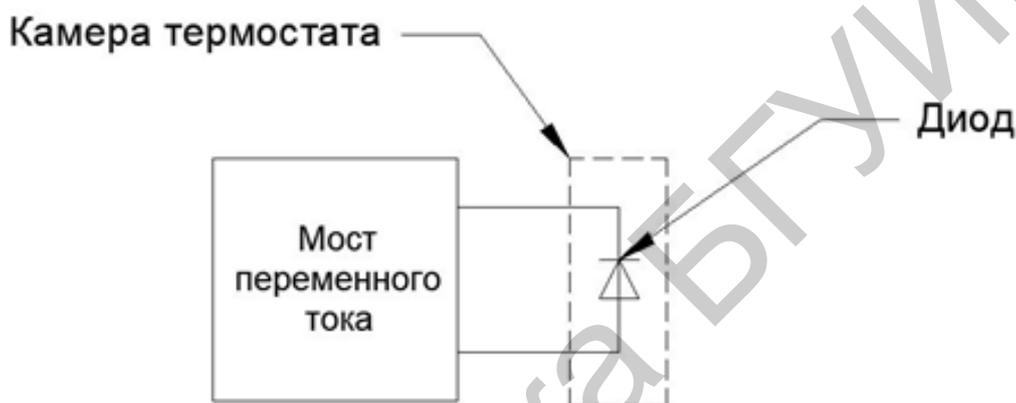


Рисунок 9.1 – Структурная схема лабораторного макета

3 Записать паспортные данные диода, выданного преподавателем для исследования.

4 Изменяя температуру нагрева камеры термостата и диода, снимать показания значений сопротивления $p-n$ -перехода при прямом и обратном включении диода.

5 Данные измерений записать в таблицу 9.1.

Таблица 9.1

Номер опыта	R , Ом	t , °C	T , К	$1/T$, К ⁻¹	$\ln R$	U_k , В	$U_{k\text{ ср}}$, В
1...							
12							

6 Начертить график зависимости $\ln R = f(1/T)$.

7 Определить U_k (рассчитать).

8 Определить среднее значение контактной разности потенциалов.

9.3 Оснащение работы

Диоды точечные германиевые, мост переменного тока, термостат типа ТС-02, соединительные провода, цифровой вольтметр типа В7-53.

9.4 Основные теоретические сведения

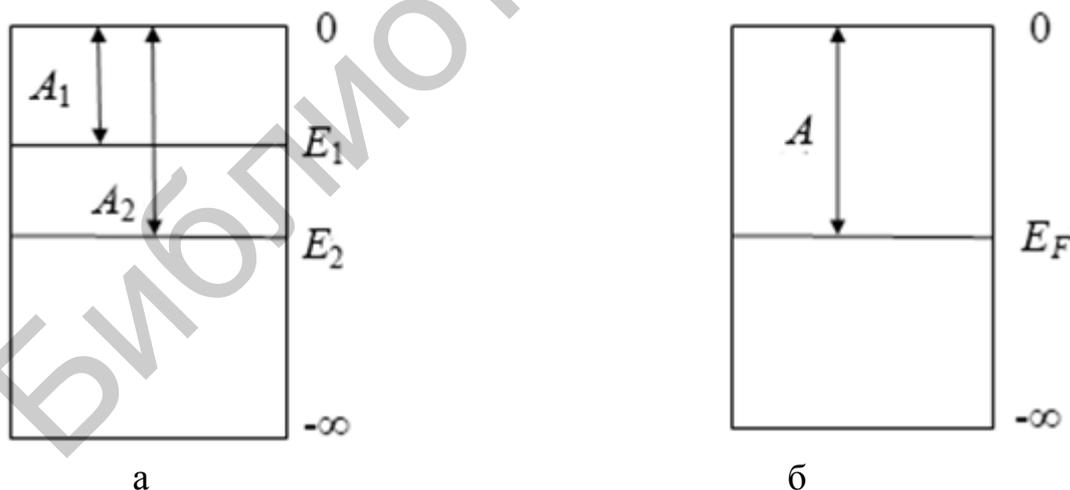
Для изучения явлений, происходящих на границе контакта двух разнородных образцов из различных материалов, необходимо знать такие понятия, как «работа выхода» и «уровень Ферми».

Под работой выхода надо понимать минимальную энергию, которую необходимо сообщить электрону для выхода его за пределы твердого тела. Она обусловлена затратой работы по преодолению сил, удерживающих его в металле силой электростатического притяжения.

Каждому электрону соответствует определенное значение энергии, а следовательно, и разные значения работы выхода. Определить значение работы выхода для каждого электрона невозможно.

Условимся считать работой выхода энергию, которую необходимо затратить, чтобы удалить электрон с уровня Ферми (т. е. соответствующий среднему значению энергии электронов в образце) на нулевой энергетический уровень. Чем выше в кристалле энергия уровня Ферми, тем меньше значение работы выхода, и наоборот.

Это легко объяснить исходя из соображений, что нахождение электрона в кристалле можно рассматривать как его пребывание в потенциальной яме. Электроны имеют разное значение энергии и разное нахождение на энергетических уровнях, например E_1 и E_2 . Работа выхода для первого электрона будет A_1 , а для второго – A_2 . Это энергия, которую необходимо затратить для перехода электрона с уровней E_1 , E_2 на нулевой уровень. Если на потенциальной диаграмме обозначить уровень Ферми E_F , то работа выхода будет равна энергии перехода электрона с уровня E_F на нулевой (рисунок 9.2).

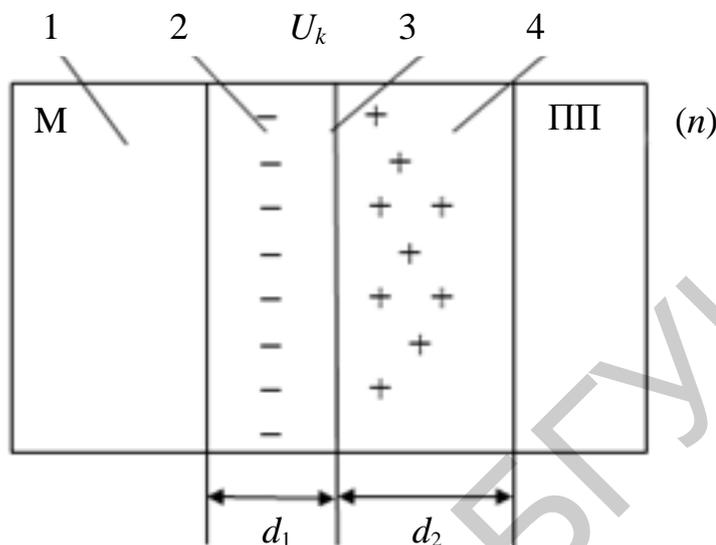


а – энергетическая диаграмма двух разных электронов с учетом работы выхода;
б – энергетическая диаграмма для электрона с учетом уровня Ферми

Рисунок 9.2 – Энергетические диаграммы для разных электронов

Работа выхода зависит от рода материала, примесей, температуры.

Определенный интерес представляет контакт М – ПП (рисунок 9.3). В этом случае будет происходить электронный обмен между контактирующими материалами, обусловленный разными значениями работы выхода. На границе контакта образуется контактная разность потенциалов.



- 1 – металл; 2 – небольшая глубина отрицательного объемного заряда;
 3 – граница контакта М – ПП донорный; 4 – большая глубина
 положительного объемного заряда в донорном полупроводнике;
 d_1, d_2 – глубина залегания объемного заряда, причем $d_1 \ll d_2$

Рисунок 9.3 – Контакт М – ПП
 с учетом распределения объемного заряда

В случае контакта М – ПП возможно:

- образование омического (невыпрямляющего) контакта, обладающего активным сопротивлением;
- образование неомического контакта (барьера Шоттки), или запирающего (выпрямляющего) контакта.

Следовательно, при определенных условиях на границе контакта М – ПП возникает выпрямляющий контакт (барьер Шоттки), который характеризуется ВАХ – графиком зависимости тока, протекающего через контакт, от величины и знака приложенной разности потенциалов.

Ток, протекающий через контакт, в данном случае выражается уравнением

$$I = i \cdot S = q \cdot A_1 \cdot e \cdot \frac{-qU_k}{kT} \left(e^{\frac{-qU}{kT}} - 1 \right) S,$$

где i – плотность тока, протекающего через контакт, А/м²;
 S – площадь контакта, м²;

q – заряд электрона, Кл;

A_1 – постоянная величина, характеризующая природу контактирующих материалов и технологию их изготовления;

$e = 2,7$ – основание натурального логарифма, безразмерная величина;

U_k – контактная разность потенциалов, В;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – температура нагрева по шкале Кельвина, К;

U – приложенная разность потенциалов, В.

Из теории известно, что

$$U_k = \frac{\Delta A}{q}; \quad U_k = \frac{\Delta E_F}{q},$$

где U_k – контактная разность потенциалов, В;

ΔA – разность работы выхода в контактирующих материалах, Дж;

q – величина заряда, Кл;

ΔE_F – разность уровней Ферми в контактирующих материалах, Дж.

Контактную разность потенциалов можно найти по ВАХ германиевого точечного диода при разных температурах (исследуя малый участок ВАХ вблизи $U \approx 0$ и дифференциальное сопротивление контакта R_0) (рисунок 9.4):

$$\frac{1}{R_0} = \left| \frac{dl}{dU} \right|_{U=0}; \quad R_0 = \frac{1}{A_1} \frac{k \cdot T}{q^2} e^{\frac{q \cdot U_k}{kT}}.$$

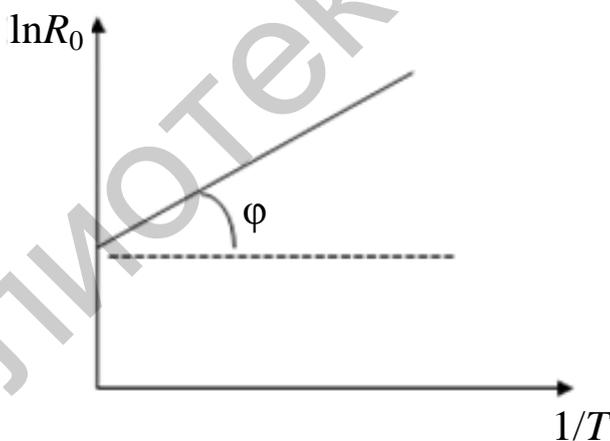


Рисунок 9.4 – График зависимости $\ln R_0 = f(1/T)$

9.5 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя диод, выписать из справочника его паспортные данные.

2 Подсоединить исследуемый диод к клеммам крышки термостата с внутренней стороны. Подсоединить выход клеммы с крышки ТС-02 к мосту переменного тока. Заземлить приборы. Включить вилки приборов в сеть. Включить тумблеры СЕТЬ.

3 Ручкой термостата задавать нужную температуру нагрева.

- 4 Выбрать на мосту переменного тока нужный предел измерения.
- 5 Подождать определенный промежуток времени, пока камера термостата нагреется до нужной температуры.
- 6 Выполнить измерения 10...12 раз.
- 7 После выполнения работы разобрать электрическую цепь, убрать рабочее место.
- 8 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

9.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № ___

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

9.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Что такое контакт?
- 2 Типы контактов.
- 3 Понятие «контактная разность потенциалов». От чего она зависит и каким образом?
- 4 Что такое работа выхода? От чего она зависит и каким образом?
- 5 Понятие «ВАХ контакта».
- 6 Барьер Шоттки.
- 7 Что представляют собой омические и неомические контакты?
- 8 Что такое энергия уровня Ферми?
- 9 Связь работы выхода с энергией уровня Ферми.

Лабораторная работа №10

Исследование параметров и характеристик светодиода

10.1 Цель работы

Изучить основные методы определения характеристик и параметров светодиодов (СИД).

10.2 Задание

1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, применяемыми в работе, знать их технические данные.

2 Изучить электрическую схему макета (рисунок 10.1).

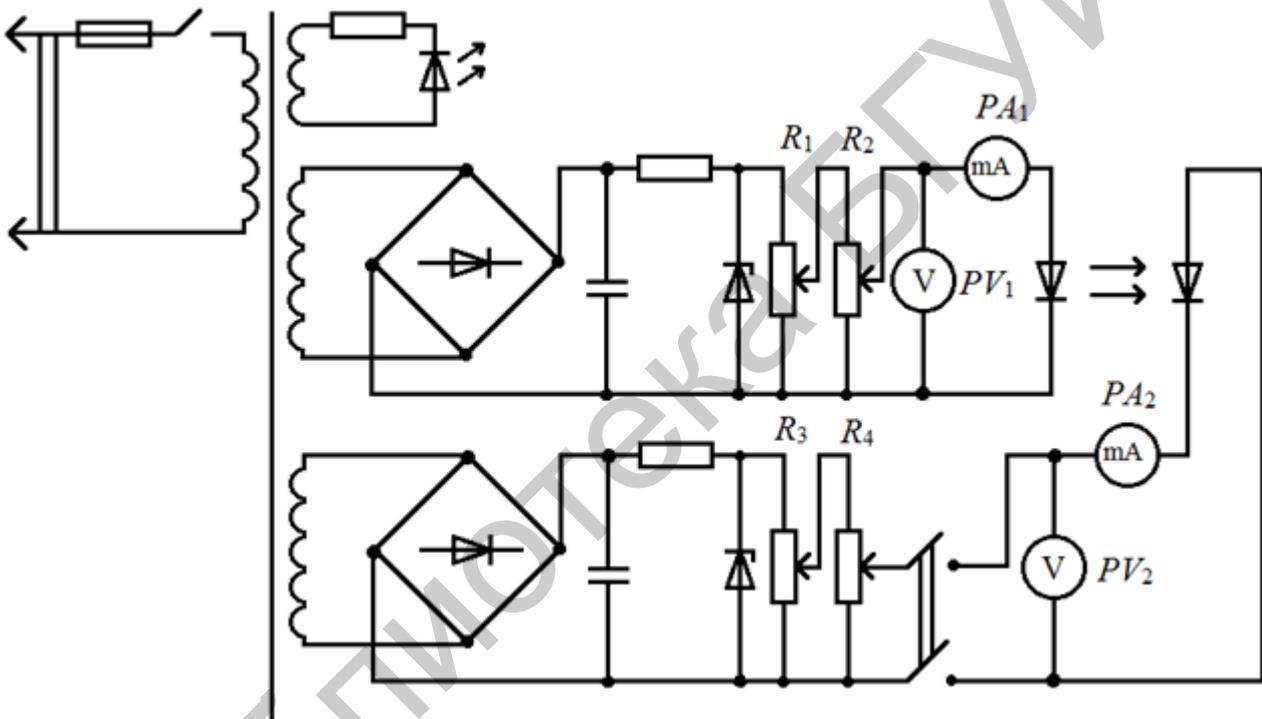


Рисунок 10.1 – Схема электрическая принципиальная макета
для изучения светодиода

3 Изучить типы корпусов светодиодов.

4 Изучить маркировку СИД.

5 Изучить методы определения соответствия выводов областям базы и эмиттера (цоколевку).

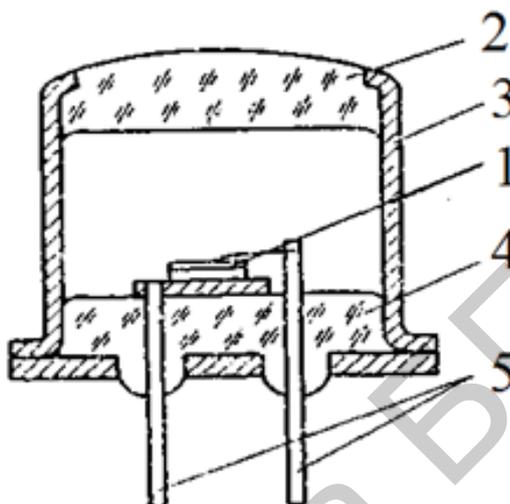
10.3 Оснащение работы

Светодиоды, макет, соединительные провода, амперметр, вольтметр, мост переменного тока Е12-2 или Е7-15.

10.4 Основные теоретические сведения

Светодиод – двухэлектродный полупроводниковый прибор, основу которого составляет *p-n*-переход и принцип работы которого основан на образовании квантов света при протекании через него электрического тока в прямом направлении.

Одна из распространенных схематических конструкций светодиода показана на рисунке 10.2.



1 – полупроводниковая пластина с *p-n*-переходом; 2 – линза;
3 – коваровый баллон; 4 – ножка; 5 – выводы

Рисунок 10.2 – Конструкция светодиода

Кристалл приваривается к подложке с выводами, которая монтируется в коваровый или керамический баллон, обладающий очень малой емкостью.

Верхняя часть корпуса заканчивается стеклянной (или из эпоксидной смолы) линзой, которая служит выходным окном для излучения, концентрирует излучение в узком конусе и защищает полупроводниковый кристалл от повреждений. Для снижения общего внутреннего отражения, а следовательно, для повышения эффективности линза разработана в виде полусферы. Это позволяет увеличить интенсивность светового потока в 5...10 раз.

Светодиоды выпускают в виде дискретных элементов и в виде матриц. Они находят применение в качестве индикаторов, буквенно-цифровых индикаторов и индикаторных панелей.

СИД имеет следующие характеристики и параметры: оптические, энергетические, элемента электрической цепи, элемента индикации и габаритные.

К оптическим параметрам светоизлучающего диода относятся длина волны излучения $\lambda_{\text{мах}}$, доминирующая длина волны излучения $\lambda_{\text{дом}}$, сила света I_c , яркость свечения B и угол излучения α . Сила излучения зависит от направления

излучения. Направленность излучения характеризуется диаграммой направленности, или углом излучения α .

СИД как элемент электрической цепи обладает характеристиками и основными параметрами: мощностью, прямым напряжением, прямым током, обратным напряжением (минимальным и максимальным), обратным током (минимальным и максимальным). Основное назначение – работа в качестве различного рода индикаторов.

ВАХ СИД – это график зависимости протекающего через СИД тока от приложенной разности потенциалов (рисунок 10.3).

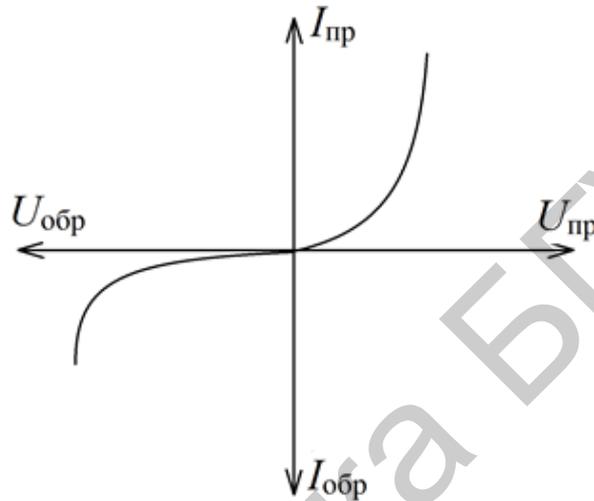


Рисунок 10.3 – ВАХ светодиода

Вольт-фарадная характеристика – это график зависимости емкости СИД (p - n -перехода) от приложенной разности потенциалов (рисунок 10.4).

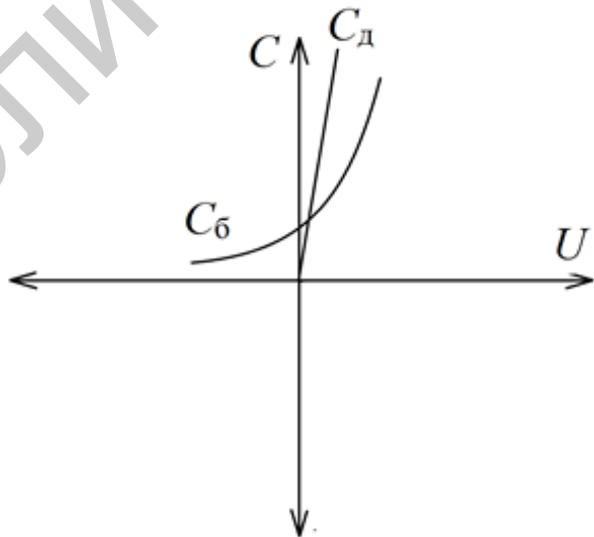


Рисунок 10.4 – Зависимость барьерной (C_b) и диффузионной (C_d) емкости светодиода (p - n -перехода) от напряжения

Диаграмма направленности – график зависимости силы света I_c СИД от угла излучения α (рисунок 10.5). Диаграмма направленности зависит от конструкции СИД.

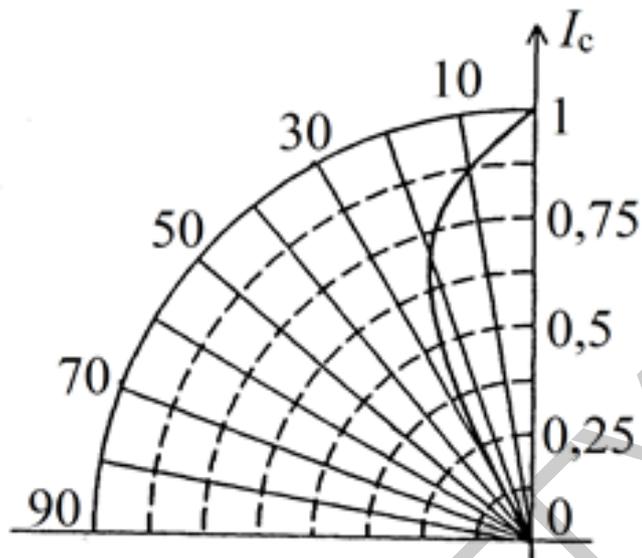


Рисунок 10.5 – Диаграмма направленности СИД

Излучательная характеристика – график зависимости светового или энергетического параметра светодиода (в зависимости от приемника) от величины протекающего тока (рисунок 10.6).

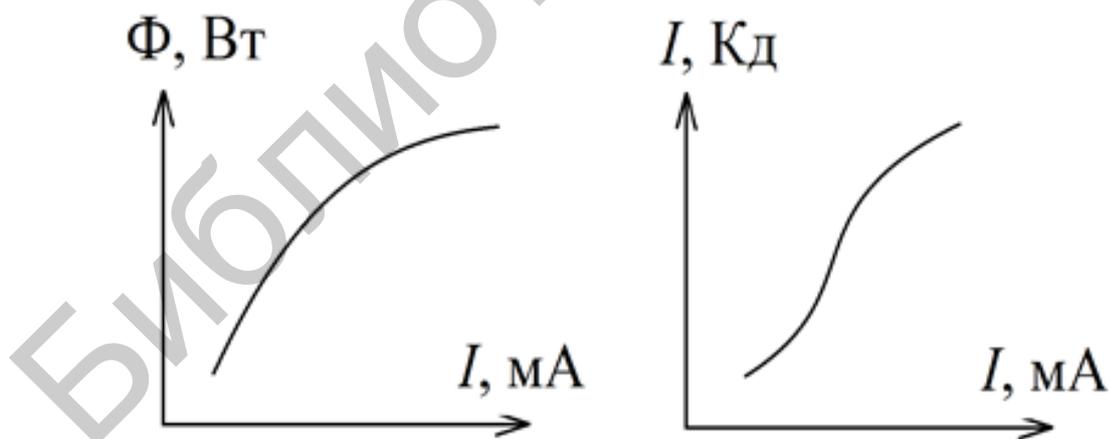
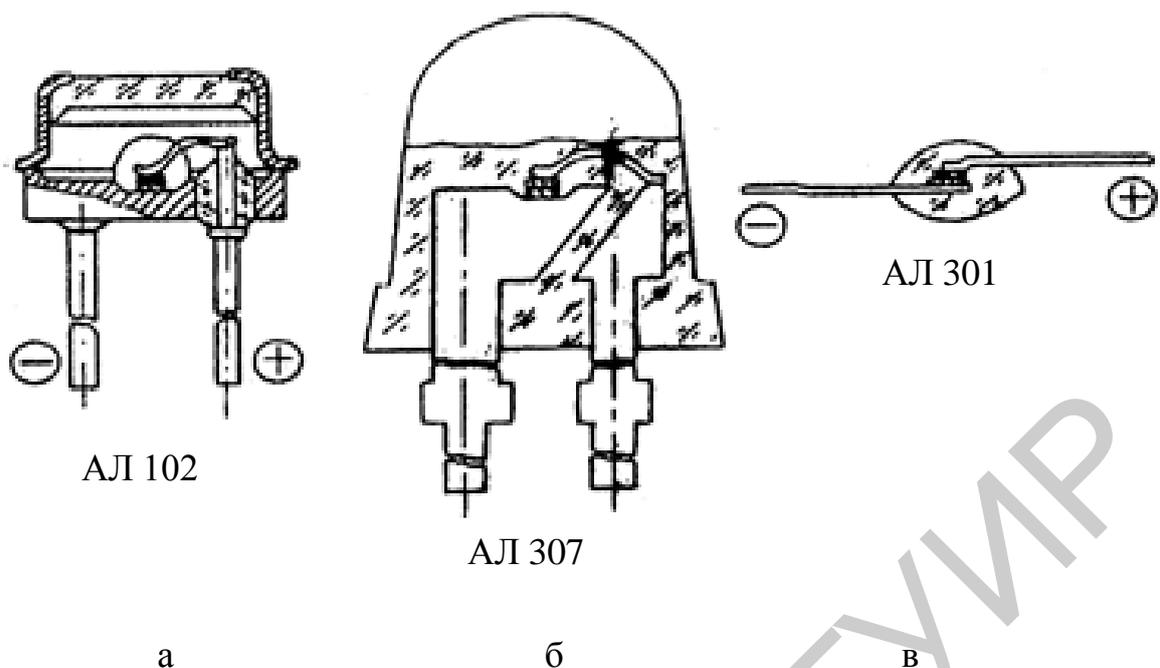


Рисунок 10.6 – Излучательная характеристика СИД

Конструктивно светодиоды могут быть оформлены по-разному: в металлоглазанных корпусах – АЛ102, пластмассовых корпусах – АЛ307 и бескорпусные – АЛ301 (рисунок 10.7). Конструкции корпусов диодов выполняются в соответствии с требованиями ГОСТ 23448–79.



а – металлостеклянный; б – пластмассовый; в – бескорпусный

Рисунок 10.7 – Типы корпусов светодиодов

Внешний вид наиболее распространенных (в пластмассовых корпусах) светодиодов показан на рисунке 10.8.

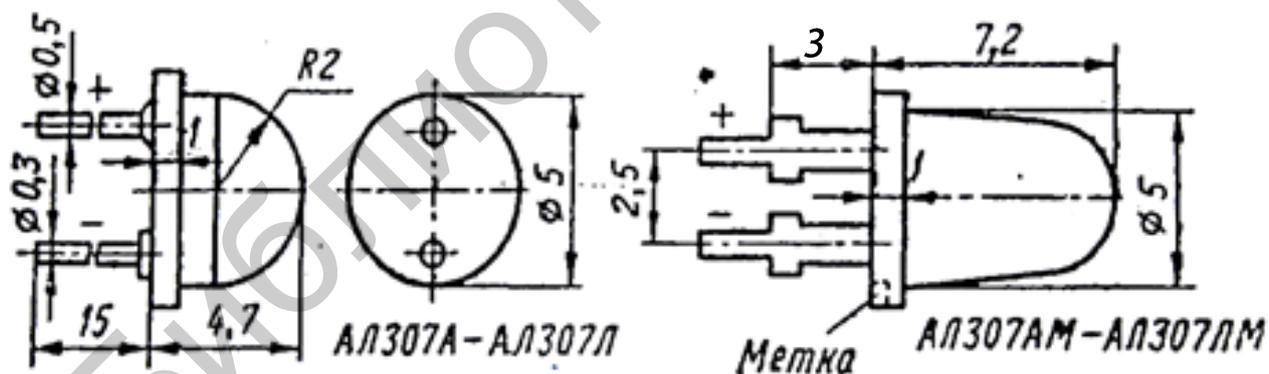
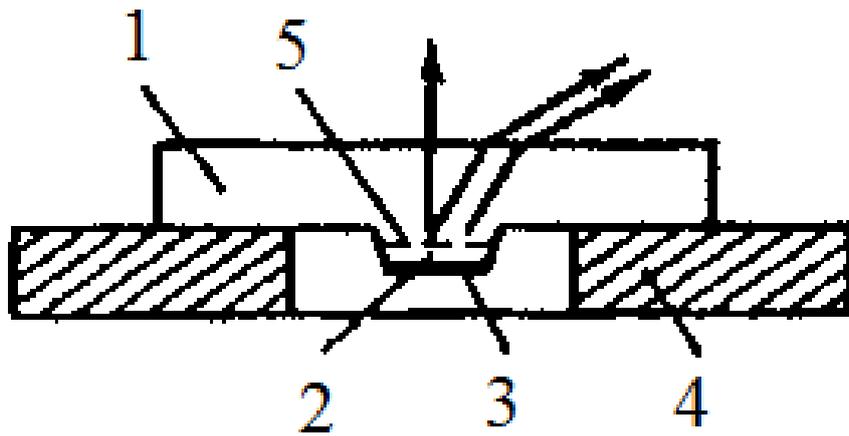


Рисунок 10.8 – Внешний вид СИД

Основу любого светодиода составляет кристалл с определенной комбинацией эпитаксиальных слоев, чаще всего выращенных на подложках из GaAs или GaP. Кристалл имеет форму квадрата со стороной 0,35...0,5 мм. Для повышения плотности тока через *p-n*-переход уменьшают размеры активной области до нескольких десятков микрометров путем формирования мезоструктуры или изолирующих аморфных слоев (рисунок 10.9).

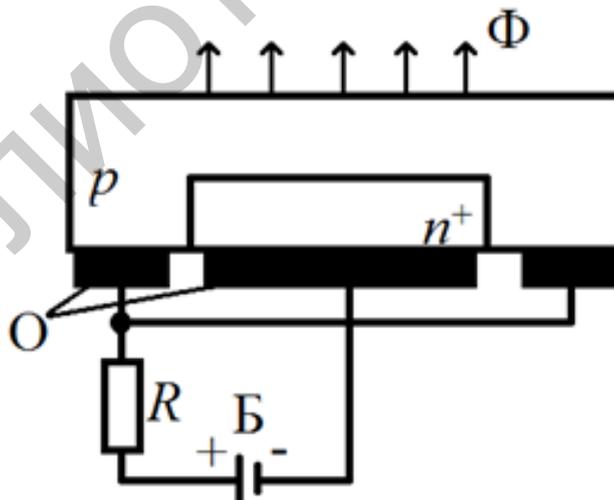


1 – n -область; 2 – p -область; 3 – омический переход к p -области;
4 – кольцевой электрод, осуществляющий контакт с базой СИД;
5 – p - n -переход

Рисунок 10.9 – Мезаструктура полупроводникового излучателя

Следовательно, чтобы излучение кристалла было в диапазоне видимого излучения (0,38...0,78 мкм), необходимы полупроводниковые материалы с шириной запрещенной зоны 1,5...3 эВ.

В полупроводниковых материалах генерация оптического излучения обеспечивается обычно с помощью электролюминесценции. Инжекционная электролюминесценция возникает в p - n -переходе, находящемся под прямым напряжением (рисунок 10.10).



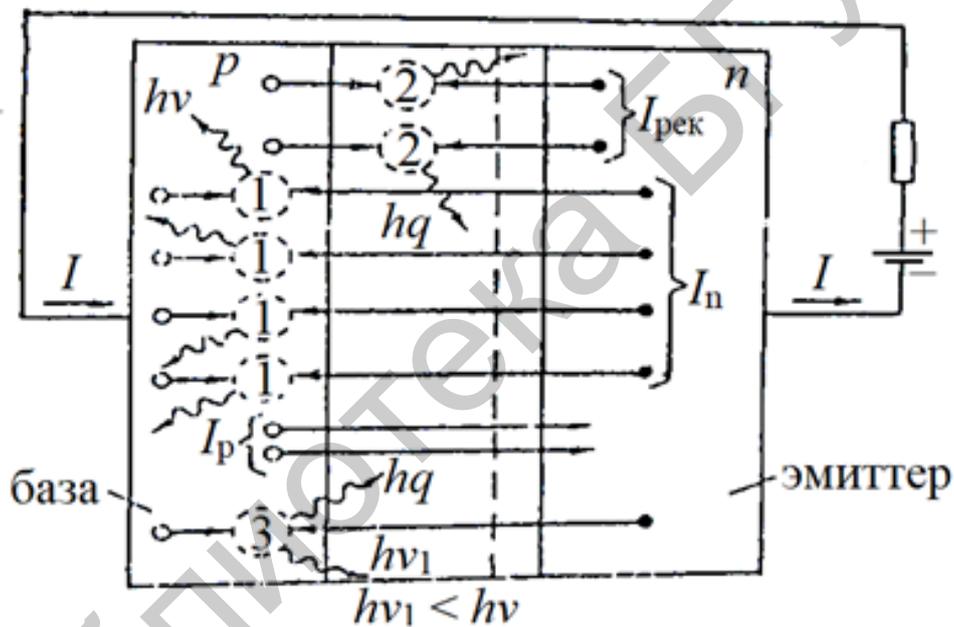
Φ – световой поток; p – высокоомная область; n – низкоомная область (сильнолегированная); R – резистор; Б – батарея;
О – омические контакты

Рисунок 10.10 – Электролюминесценция p - n -перехода

Излучающей является область только по одну сторону p - n -перехода (p -область на рисунке 10.10). Слаболегированная p -область имеет высокое сопротивление, ее называют базой. Сильнолегированная n -область имеет малое сопротивление, ее называют эмиттером. Таким образом, в излучательной структуре инжекция практически односторонняя (из эмиттера в базу), и поэтому базовая область начинает излучать свет.

В p - n -переходе оказывается значительным и даже преобладающим ток, вызванный процессами рекомбинации в области объемного заряда p - n -перехода. Чем больше ширина запрещенной зоны контактирующих материалов, тем больше потенциальный барьер и тем больше рекомбинация электронов в p - n -переходе.

Рекомбинация происходит на глубоких центрах люминесценции и заканчивается границей фонона $h \cdot q = E_{\text{тепл}}$ (генерация на центрах рекомбинации 2 на рисунке 10.11).



- 1 – центры рекомбинации оптического излучения;
- 2 – центры рекомбинации фононов (теплового излучения);
- 3 – центры рекомбинации длинноволновых фотонов

Рисунок 10.11 – Составляющие тока, проходящего через p - n -переход, при инжекционной электролюминесценции

Электронный ток I_n , инжектируемый эмиттером, обеспечивает излучательную рекомбинацию в p -базе. Коэффициент инжекции $\eta_{\text{и}}$, являющийся безразмерной величиной, равен

$$\eta_{\text{и}} = \frac{I_n}{I},$$

где I_n – электронный ток, А;

I – полный ток, А.

Полный ток состоит из электронной дырочной составляющей, тока безызлучательной рекомбинации, туннельного поверхностного тока (см. рисунок 10.11).

Количественно эффективность рекомбинации при люминесценции характеризуют внутренним квантовым выходом $\eta_э$, который определяют отношением числа актов излучательной рекомбинации к полному числу актов (излучательной и безызлучательной) рекомбинации.

Иногда $\eta_э$ определяется отношением генерированных фотонов к числу инжектированных в активную область за то же время неосновных носителей заряда (в рассматриваемом примере – электронов в p -область), также $\eta_э$ определяется технологией изготовления p - n -перехода и электрическими параметрами режима его работы, т. е. плотностью тока.

Эффективность инжекционной электролюминесценции определяется произведением $\eta_{ин} \cdot \eta_э$ для p - n -перехода. Качество излучения характеризуется внешним квантовым выходом η :

$$\eta = \eta_{ин} \cdot \eta_э \cdot \eta_{опт},$$

где $\eta_{ин}$ – коэффициент инжекции;

$\eta_э$ – внутренний квантовый выход;

$\eta_{опт}$ – оптическая эффективность или коэффициент вывода света.

Одной из характеристик светоизлучающих диодов является излучательная характеристика.

Ряд светодиодов маркируется цветными точками на корпусе (таблица 10.1).

Таблица 10.1

Тип светодиода	Цвет и количество точек	Тип светодиода	Цвет и количество точек
АЛ102А	Одна красная	АЛ305Г	Одна красная
АЛ102Б	Две красные	АЛ305Д	Две синие
АЛ102В	Одна зеленая	АЛ305Е	Одна синяя
АЛ102Г	Три красные	АЛ305Ж	Две черные
АЛ102Д	Две зеленые	АЛ305И	Одна черная
АЛ305А	Две белые	АЛ305К	Черная и белая
АЛ305Б	Одна белая	АЛ305Л	–
АЛ305В	Две красные	АЛ306А	Две белые
АЛ306Б	Одна белая	АЛ306В	Две черные
АЛ307А	Одна черная	АЛ307Б	Две черные
АЛ307В	Одна черная	АЛ307Г	Две черные
АЛС314А	Две белые		

10.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя светоизлучающий диод, выписать из справочника его паспортные данные.
- 2 Подсоединить исследуемый СИД к клеммам макета. Заземлить приборы. Включить вилку прибора в сеть. Включить тумблер СЕТЬ.
- 3 Выбрать на приборах нужные пределы измерений.
- 4 Ручками резисторов R_1 и R_2 выставить напряжение U_1 .
- 5 При определенных значениях U_1 измерить U_2 при разомкнутом B_k .
- 6 Выполнить измерения 12 раз и данные записать в таблицу 10.2.

Таблица 10.2

Номер опыта	$U_{пр}, В$	$I_{пр}, А$	$U_{обр}, В$	$I_{обр}, А$	$R, Ом$	$P, Вт$
1 ...						
12						

В зависимости от условия задания, выданного преподавателем, таблица может содержать другие показатели.

- 7 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

10.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа №__

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

10.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Параметры СИД.
- 2 Характеристики СИД.
- 3 Область применения СИД.
- 4 Марки СИД.
- 5 Объяснить свечение $p-n$ -перехода.
- 6 Типы корпусов СИД.
- 7 Световые и энергетические характеристики излучения.
- 8 Что представляет собой диаграмма направленности СИД?

Лабораторная работа №11 Исследование характеристик фотодиодов

11.1 Цель работы

Изучить принцип действия, конструкции, основные методы определения параметров и характеристик фотодиодов (ФД).

11.2 Задание

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, макетом.
- 2 Изучить электрическую схему макета (рисунок 11.1).

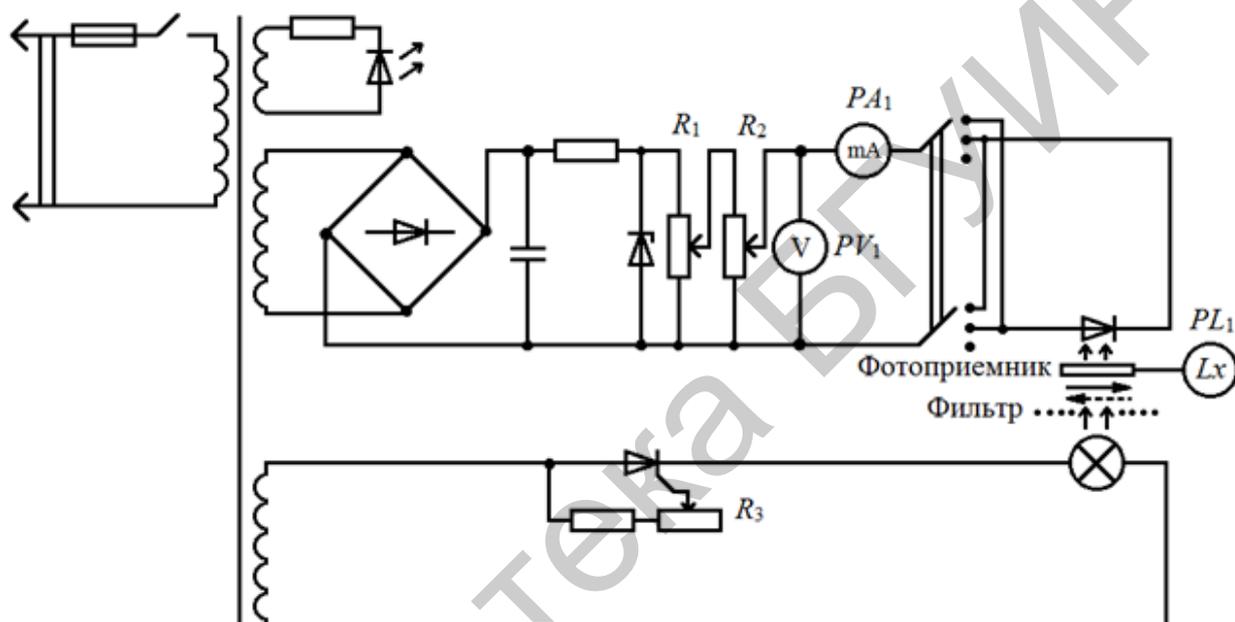


Рисунок 11.1 – Схема электрическая принципиальная макета для изучения фотодиода

3 Изменяя с помощью резисторов R_1 и R_2 напряжение, подаваемое на ФД, определить величину тока при постоянном значении светового потока, или освещенности, и определенном светофильтре. Данные измерений записать в таблицу 11.1.

Таблица 11.1

Номер опыта	U , В	I , А	Φ , лм	E , лк	Цвет светофильтра
1 ...			const	const	Определенный
12					

4 Изменяя с помощью резистора R_3 величину светового потока, освещенности, определить величину тока при постоянном напряжении на ФД и определенном светофильтре, данные измерений записать в таблицу 11.2.

Таблица 11.2

Номер опыта	U , В	I , А	Φ , лм	E , лк	Цвет светофильтра
1 ...	const				Определенный
12					

Каждому цвету излучения (цвету светофильтра) соответствует своя длина волны. Соотношение между цветом излучения и длиной волны представлено в таблице 7.2 (см. лабораторную работу №7).

5 Начертить графики зависимостей: ВАХ $I = f(U)$ при $E = \text{const}$ и определенном светофильтре; ЛАХ (люкс-амперная характеристика) $I = f(E)$ при $U = \text{const}$ и определенном светофильтре.

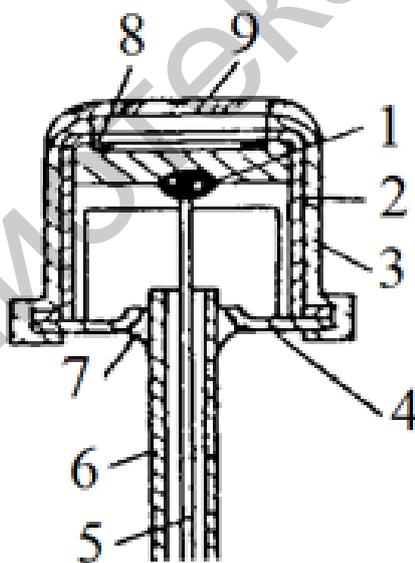
11.3 Оснащение работы

Фотодиод, лабораторный макет, амперметр, вольтметр, люксметр Ю-16 (Ю-116), набор светофильтров, вольтметр В7-27.

11.4 Основные теоретические сведения

Фотодиодом называется полупроводниковый прибор с p - n -переходом, принцип работы которого основан на эффекте изменения ВАХ при действии на него светового излучения.

Одна из наиболее распространенных конструкций фотодиода показана на рисунке 11.2.



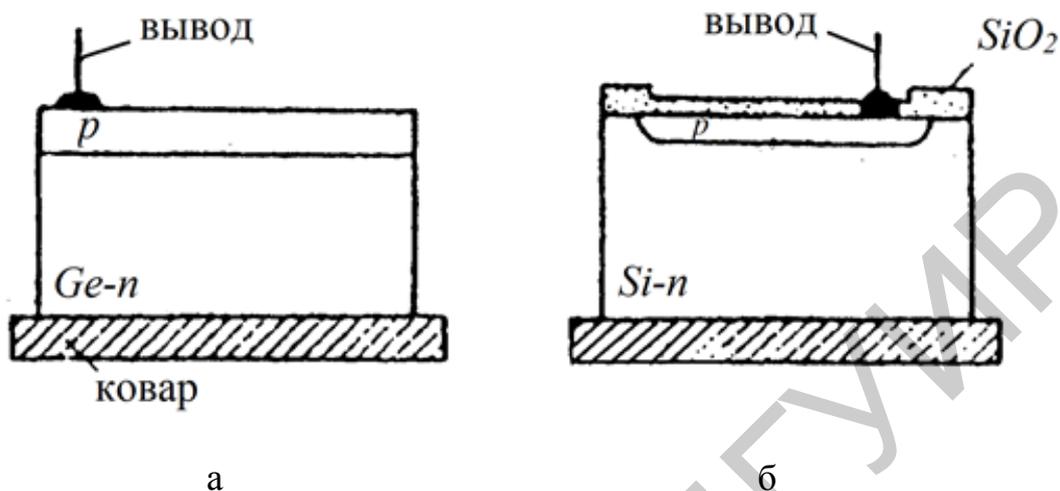
- 1 – кристалл германия с p - n -переходом; 2 – кристаллодержатель;
 3 – металлический корпус; 4 – кольцо; 5 – вывод;
 6 – металлическая трубка; 7 – стеклянный изолятор;
 8 – оловянное кольцо; 9 – стеклянное окно

Рисунок 11.2 – Конструкция фотодиода ФД-1

Конструктивно фотодиоды могут быть оформлены в металлостеклянных, пластмассовых корпусах или быть бескорпусными.

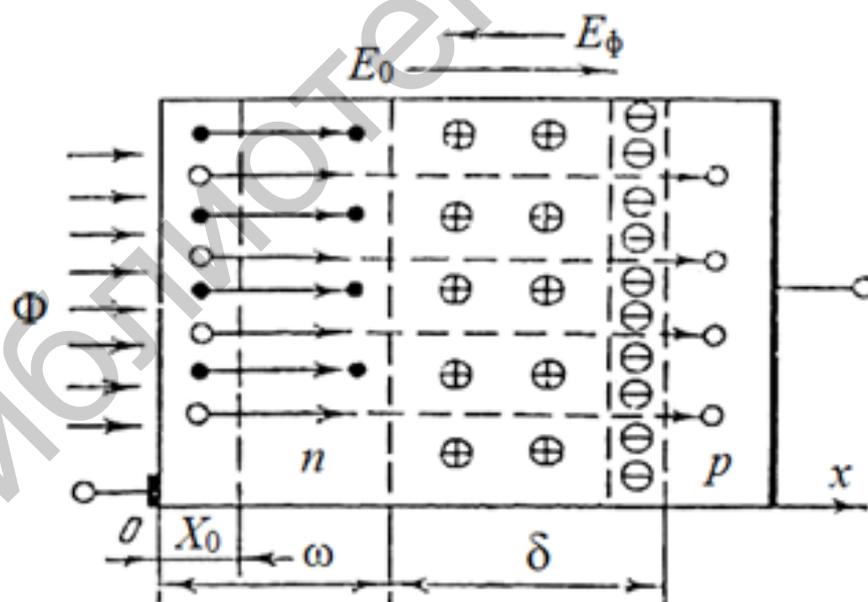
Структура фотодиода показана на рисунке 11.3.

На рисунке 11.4 показан принцип работы фотодиода.



а – структура диффузионного фотодиода;
б – структура планарного фотодиода

Рисунок 11.3 – Структура кремниевого фотодиода



Φ – направление светового потока; X_0 – толщина приповерхностного слоя;
 ω – ширина n -области; E_0 – направление электрического поля
 p - n -перехода; E_Φ – направление фотоЭДС; δ – ширина p -области

Рисунок 11.4 – Воздействие света на структуру фотодиода

Пусть излучение воздействует в направлении, перпендикулярном плоскости p - n -перехода. В результате поглощения фотонов с энергией, большей чем ширина запрещенной зоны, в n -базе на глубине примерно X_0 от поверхности полупроводника возникают электронно-дырочные пары (фотоносители).

Фотоносители диффундируют в глубь n -области. Ширина n -области ω такова, что основная доля созданных излучением фотоносителей не успевает рекомбинировать в n -область и доходит до границы p - n -перехода ($X = \omega$). Электроны и дырки разделяются электрическим полем p - n -перехода E_0 . При этом дырки переходят в p -область, а электроны не могут преодолеть поле перехода E_0 и скапливаются у границы p - n -перехода в n -области (см. рисунок 11.4). Таким образом, прохождение тока фотоносителей через p - n -переход обусловлено дрейфом неосновных носителей – дырок.

Качество функционирования фотодиода определяется прежде всего эффективностью управления фототоком с помощью излучения. Именно оптическое управление током фотодиода определяет особенности режимов работы.

В фотодиоде p - n -переход разделяет созданные излучением фотоносители. Это приводит к снижению внутреннего потенциального барьера в фотодиоде.

Дрейфовый поток фотоносителей называется фототоком I_{Φ} . Фотоносители-дырки заряжают p -область положительно относительно n -области, а фотоносители-электроны – n -область отрицательно по отношению к p -области. Возникшая таким образом разность потенциалов E_{Φ} , называемая фотоЭДС, снижает внутренний потенциальный барьер до значения

$$\Delta E = E_0 - E_{\Phi}.$$

Накопление фотоносителей в соответствующих областях имеет ограничение: одновременно с накоплением дырок в p -области и электронов в n -области происходит понижение потенциального барьера E_0 на значение возникающей фотоЭДС. Очевидно, что E_{Φ} должна быть меньше E_0 , т. к. разделение фотоносителей возможно только при наличии потенциального барьера.

Фотодиоды имеют следующие основные параметры:

- темновой ток – ток, протекающий через фотодиод при приложенном рабочем напряжении через 30 с после снятия освещенности 200 лк;
- световой ток – ток, протекающий через фотодиод при приложенном рабочем напряжении и освещенности 200 лк от источника света с цветовой температурой 2850 К;
- наибольшее изменение светового тока по истечении гарантийного срока;
- фототок – разность между световым и темновым токами;
- температурный коэффициент (ТК) фототока (I_{Φ}) – изменение фототока при изменении температуры фотодиода на 1 °С;
- рабочее напряжение – напряжение, которое можно приложить к фотодиоду при длительной эксплуатации без изменения его параметров свыше установленных;

- напряжение собственных шумов – напряжение шумов на фотодиоде, обусловленное протеканием через него тока и отнесенное к 1 В приложенного напряжения постоянного тока;

- темновое сопротивление – сопротивление фотодиода при температуре 20 °С через 30 с после снятия освещенности 200 лк;

- интегральная чувствительность – отношение приращения фототока к величине приращения вызвавшего его светового потока при отсутствии нагрузки и постоянном напряжении на фотодиоде;

- в некоторых случаях указывают значение вольтовой чувствительности в вольтах на люмен; чувствительность измеряют при освещении фотодиода от источника света с цветовой температурой 2850 К;

- удельная чувствительность K_0 (А/(лм·В)) – отношение фототока к произведению величин падающего на фотодиод светового потока и приложенного к нему напряжения:

$$K_0 = \frac{I_{\Phi}}{\Phi \cdot U_{\Phi}} \quad \text{или} \quad I_{\Phi} = K_0 \cdot \Phi \cdot U_{\Phi},$$

где I_{Φ} – фототок, А;

Φ – световой поток, лм;

U_{Φ} – напряжение фотодиода, В;

- пороговая чувствительность – наименьший световой поток, вызывающий появление на фотодиоде напряжения, вдвое превышающего уровень его шумов;

- постоянная времени – время, в течение которого фототок изменяется в $e = 2,7$ раз при освещении или затемнении фотодиода по отношению к установившемуся значению; различают постоянную времени по нарастанию и постоянную времени по спаданию;

- время нарастания переднего фронта светового тока составляет 63 % от максимального, время спадания – 37 % от максимального;

- мощность рассеивания – наибольшая допустимая мощность, которую фотодиод может рассеивать при непрерывной электрической нагрузке и установленной температуре окружающей среды, не изменяя параметров свыше норм, установленных технологическими условиями;

- длина волны, соответствующая максимуму спектральной чувствительности;

- постоянная времени (10 мс...1 нс);

- длинноволновая граница.

Значения параметров некоторых фотодиодов приведены в таблице 11.3.

Фотодиоды обладают следующими характеристиками:

- ВАХ ($I = f(U)$) – график зависимости светового (при постоянном световом потоке (освещенности)), темнового или фототока от приложенной разности потенциалов;

- световая, или люкс-амперная, характеристика ($I_{\Phi} = f(E)$) – график зави-

симости фототока от падающего светового потока, или освещенности (при постоянном напряжении на фоторезисторе);

- спектральная характеристика ($I_{\Phi} = f(\lambda)$) – график зависимости фототока от длины волны падающего светового потока (при постоянном напряжении на фотодиоде);

- частотная характеристика ($I_{\Phi} = f(\nu)$) – график зависимости фототока от частоты модуляции светового потока (при постоянном напряжении на фотодиоде).

Таблица 11.3

Параметр	Тип фотодиода				
	ФД-1	ФД-2	ФД-3	ФД-1К	ФД-2К
Рабочее напряжение, В	1,5	30	10	20	10
Максимальное обратное напряжение, В	20	50	20	30	20
Темновой ток при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$, не более, мкА	30	25	15	3	10
Интегральная чувствительность, не менее, мА/лм	20	10	20	3	3
Площадь светочувствительной поверхности, мм ²	5	1	2	2	20
Постоянная времени, с	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
Диапазон допустимых температур, град	-60...+40	-40...+45	-60...+60	-50...+80	-50...+85

Связь светового потока и освещенности:

$$\Phi = E \cdot S,$$

где Φ – световой поток, падающий на активную часть фотодиода, лм;

E – освещенность активной части фотодиода, лк;

S – площадь активной части фотодиода, м².

11.5 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя фотодиод, выписать из справочника его паспортные данные.

2 Подсоединить фотодиод к макету. Включить вилки приборов (макета и вольтметра) в сеть. Включить тумблеры приборов СЕТЬ.

3 Ручкой регулятора (резистор R_3) установить нужную освещенность.

4 Устанавливая разные значения U ручками ГРУБО (резистор R_1) и ТОЧНО (резистор R_2), получить соответствующие значения I .

5 Измерить люксметром освещенность.

- 6 Выбрать на измерительных приборах нужные пределы измерений.
- 7 Выполнить измерения и заполнить таблицы 11.1 и 11.2.
- 8 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

11.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа №__

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

11.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Конструкция фотодиода.
- 2 Маркировка фотодиодов.
- 3 Область применения фотодиодов.
- 4 Технические данные люксметра, принцип работы.
- 5 Как изменяется чувствительность ФД при освещении?

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №12

Исследование фотодиода как источника фотоЭДС

12.1 Цель работы

Изучить способы исследования фотодиода как источника фотоЭДС.

12.2 Задание

1 Научиться пользоваться измерительными приборами, макетом.

2 Изучить схему электрическую принципиальную макета (рисунок 12.1).

3 Изменяя величину светового потока (освещенность p - n -перехода) с помощью резистора R_1 (ОСВЕЩЕННОСТЬ), измерять значения фотоЭДС при одном светофильтре.

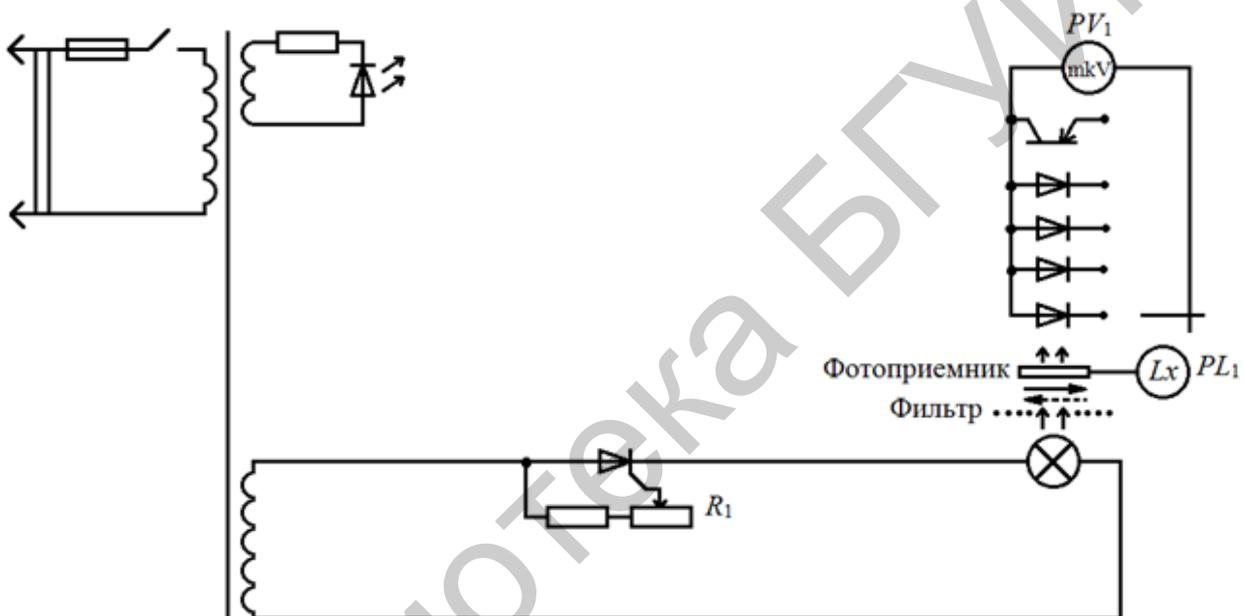


Рисунок 12.1 – Схема электрическая принципиальная прибора для изучения фотоЭДС

4 Прodelать аналогичные измерения при других светофильтрах. Данные измерений записать в таблицу 12.1.

Таблица 12.1

Номер опыта	U , В	Φ , лм	E , лк	Цвет светофильтра
1 ...		const	const	Определенный
12				

Начертить графики зависимости $U = f(E)$ при разных светофильтрах.

5 С помощью резистора R_1 выбрать произвольную величину освещенности образца. Устанавливая различные светофильтры при $E = \text{const}$, произвести измерения фотоЭДС. Данные измерений записать в таблицу 12.2.

Таблица 12.2

Номер опыта	Цвет светофильтра	λ , нм	U , В	E , лк	Φ , лм	Экспериментальное λ , нм
1	Красный	620...650				
2	Оранжевый	590...620				
3	Желтый	560...590				
4	Зеленый	500...560				
5	Голубой	480...500				
6	Синий	450...480				
7	Фиолетовый	480...				

Необходимо помнить, что каждому цвету излучения (цвету светофильтра) соответствует своя длина волны. Соотношение между цветом излучения и длиной волны представлено в таблице 7.2 (см. лабораторную работу №7).

12.3 Оснащение работы

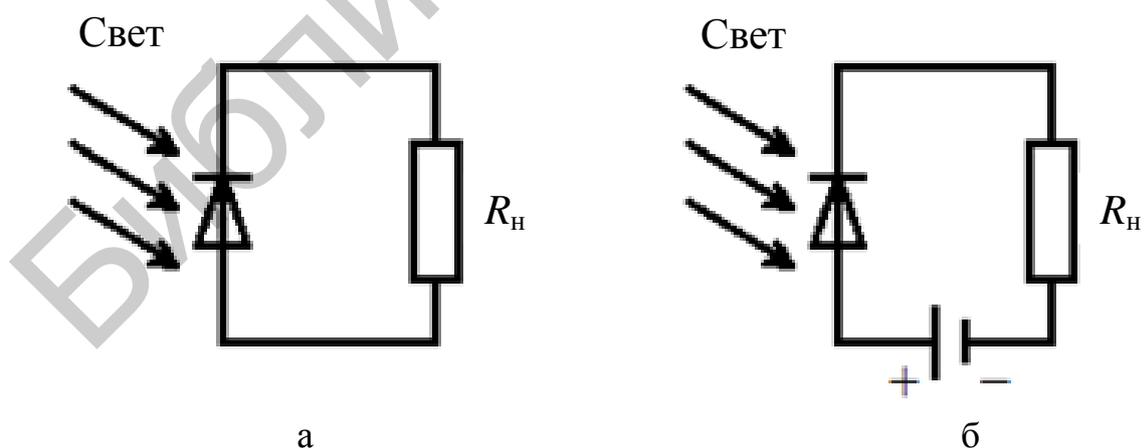
Набор фотодиодов, соединительные провода, источник света, регулируемый по яркости, люксметр типа Ю-16 (Ю-116), вольтметр типа В7-53, макет.

12.4 Основные теоретические сведения

Фотодиод – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, обратный ток которого изменяется под действием светового излучения.

Фотодиод может работать в вентильном (фотогальваническом) и фотодиодном режимах (рисунок 12.2).

В качестве источника фотоЭДС может быть фотодиод, фотоэлемент, фототранзистор. Их структуры представлены на рисунке 12.3.



а – вентильный режим; б – фотодиодный режим

Рисунок 12.2 – Схема включения фотодиодов

Принцип работы фотодиода как источника фотоЭДС показан на рисунке 11.4 (см. лабораторную работу №11).

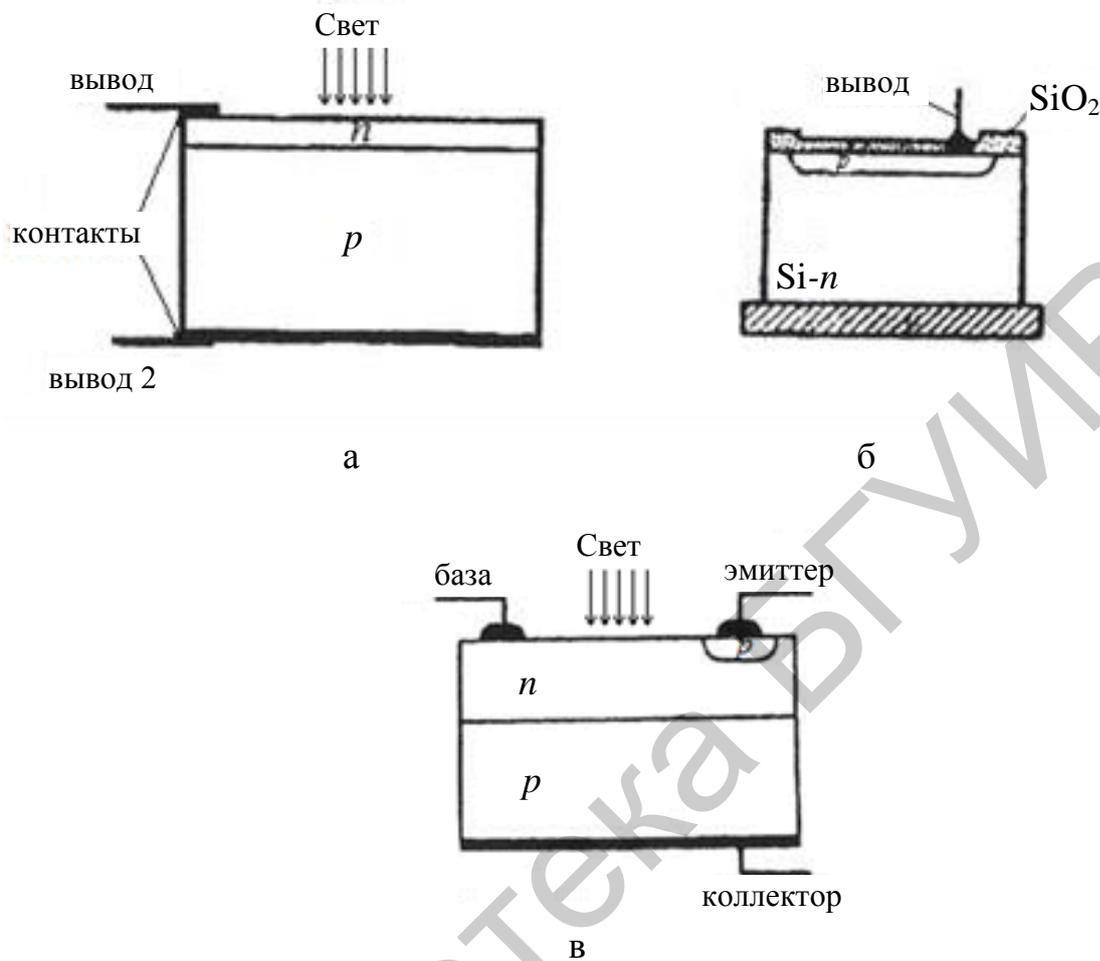


Рисунок 12.3 – Схематическое изображение структур фотодиода (а), фотоэлемента (б), фототранзистора (в)

Таким образом, $p-n$ -переход является источником фотоЭДС, если он включен в фотогальваническом режиме. Включение фотоэлементов, фотодиодов, фототранзисторов как источников фотоЭДС может быть последовательным, параллельным, смешанным.

При включении $p-n$ -перехода образуется фотоЭДС (U , В), равная

$$U = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_c}{I_s} \right),$$

где I_c – ток неосновных носителей заряда, возбужденных светом, А;

I_s – ток неосновных носителей заряда, проходящих через неосвещенный $p-n$ -переход, равный току насыщения включенного в запорном направлении $p-n$ -перехода, А.

Величина возникающей фотоЭДС будет зависеть от светового потока (освещенности), падающего на $p-n$ -переход, и цвета потока.

12.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя фотодиод или полупроводниковый фотоэлемент.
- 2 Подсоединить исследуемый прибор к макету. Подсоединить выход макета к цифровому вольтметру. Включить вилки приборов (макета и вольтметра) в сеть. Включить тумблеры приборов СЕТЬ.
- 3 Измерить люксметром освещенность.
- 4 Ручкой накала (резистор R_1) установить нужную освещенность.
- 5 Выбрать на люксметре или вольтметре нужные пределы измерений.
- 6 Выполнить измерения (по 12 раз при каждом светофильтре) и заполнить таблицы 12.1, 12.2.
- 7 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

12.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

12.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Понятие фотоЭДС.
- 2 Красная граница фотоЭДС.
- 3 Образование фотоЭДС на $p-n$ -переходе.
- 4 Типы фотодиодов и солнечных батарей.
- 5 Параметры, характеристики фотодиодов и фотоэлементов.
- 6 Способы соединения солнечных батарей.

Лабораторная работа №13 Исследование основных параметров и характеристик фоторезистора

13.1 Цель работы

Ознакомиться с конструкцией фоторезисторов, изучить их основные параметры и характеристики.

13.2 Задание

1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, применяемыми в работе.

2 Изучить макет (рисунок 13.1).

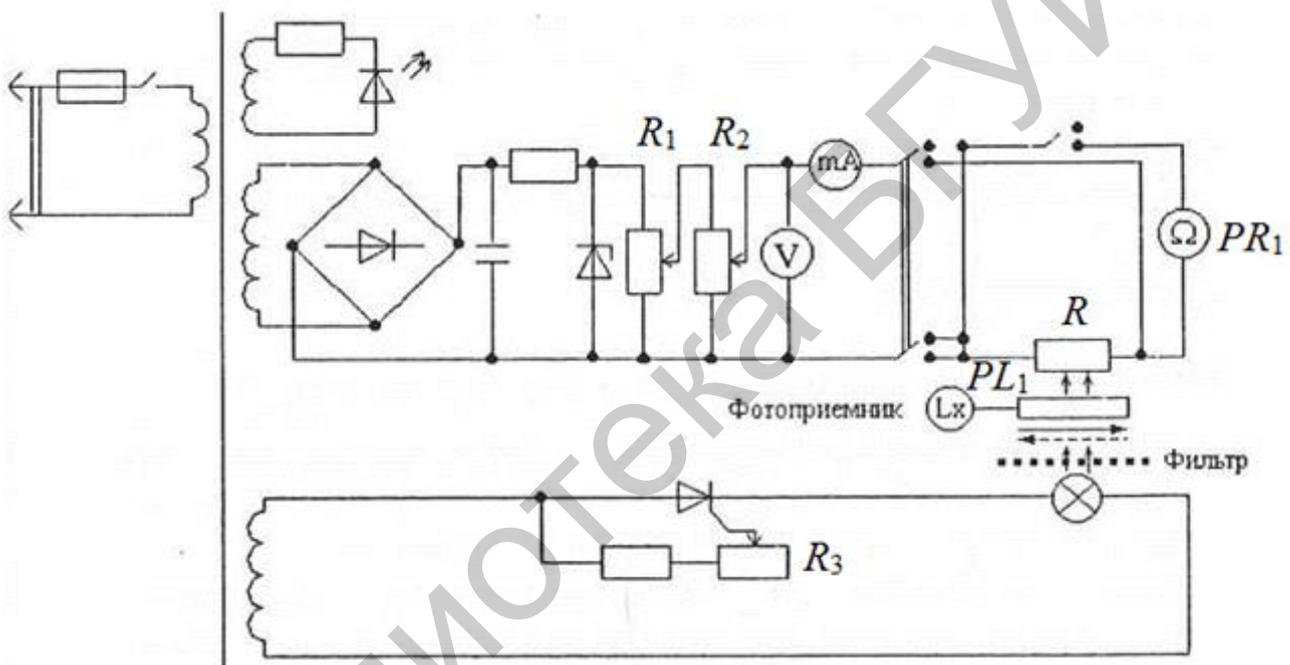


Рисунок 13.1 – Схема электрическая принципиальная макета для изучения фотопроводимости

3 Измерить ток, протекающий через фоторезистор, при изменении напряжения резисторами R_1 (ГРУБО) и R_2 (ТОЧНО) и постоянном световом потоке.

4 Измерить ток, протекающий через фоторезистор, при изменении светового потока резистором R_3 (ОСВЕЩЕННОСТЬ) при постоянной разности потенциалов на резисторе.

5 Измерить ток, протекающий через фоторезистор, при постоянном напряжении на фоторезисторе и постоянном световом потоке, изменяя при этом светофильтры. Соотношение между цветом излучения и длиной волны представлено в таблице 7.2 (см. лабораторную работу №7).

6 Результаты измерений, полученные при выполнении пунктов 3–5, записать в таблицу 13.1 – для ВАХ, 13.2 – для световой характеристики и 13.3 – для спектральной характеристики.

Таблица 13.1

Номер опыта	U , В	I , А	Φ , лм	E , лк	Цвет светофильтра
1 ...			const	const	
12					

Таблица 13.2

Номер опыта	U , В	I , А	Φ , лм	E , лк	Цвет светофильтра
1 ...	const				
12					

Таблица 13.3

Номер опыта	Цвет светофильтра	U , В	I , А	Φ , лм	E , лк
1	Синий	const		const	const
2	Голубой				
3	Зеленый				
4	Желтый				
5	Оранжевый				
6	Красный				

7 Пользуясь данными таблиц 13.1–13.3, построить графики зависимостей ВАХ, ЛАХ, спектральной характеристики (при возможности) для разных фоторезисторов.

13.3 Оснащение работы

Набор фоторезисторов, лабораторный макет, люксметр, амперметр, вольтметр, набор светофильтров.

13.4 Основные теоретические сведения

Фоторезистор – полупроводниковый прибор, изменяющий свое сопротивление под действием светового потока.

Изменение проводимости объясняется изменением концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковом материале, т. е. должно соблюдаться условие

$$h\nu \geq \Delta E \text{ при } \Delta E \geq \Delta E_{\text{акт}},$$

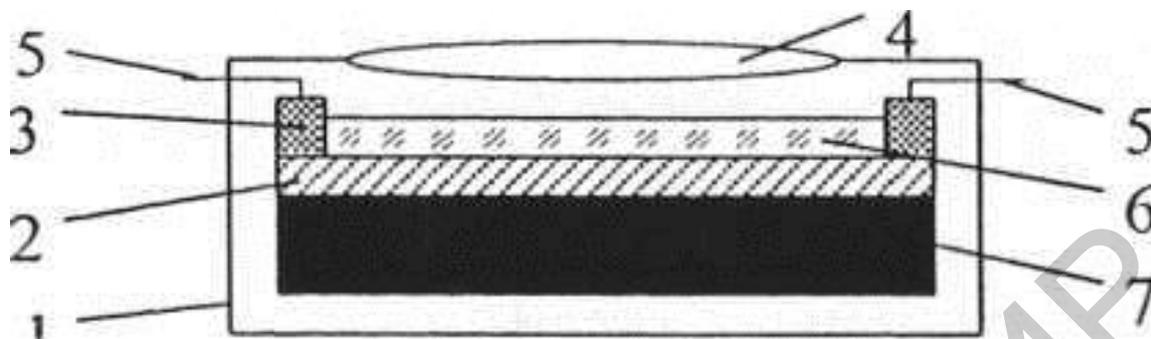
где h – постоянная Планка, Дж·с;

ν – частота излучения, с⁻¹;

ΔE – энергия кванта излучения, Дж;

$\Delta E_{\text{акт}}$ – энергия активации полупроводникового материала, Дж.

На рисунке 13.2 схематично показана конструкция фоторезистора.



1 – корпус; 2 – полупроводниковый материал; 3 – омычешский контакт; 4 – возможная линза; 5 – вывод; 6 – прозрачный лак;
7 – диэлектрическая подложка

Рисунок 13.2 – Конструкция фоторезистора

В зависимости от спектральной чувствительности фоторезисторы делят на две группы:

- а) для видимой части спектра;
- б) для инфракрасной части спектра.

Для изготовления чувствительного элемента фоторезистора используют моно- или поликристаллические соединения кадмия и свинца.

Обозначение фоторезисторов ранних выпусков: первый элемент – буквы, обозначающие тип прибора (ФС – фотосопротивление); второй элемент – буква, обозначающая материал чувствительного элемента (Л – сернистый свинец, К – сернистый кадмий – селенистый кадмий); третий элемент – цифра, обозначающая тип конструкторского исполнения.

Обозначение новых типов фоторезисторов: первый элемент – буквы, обозначающие тип прибора (СФ – сопротивление фоточувствительное); второй элемент – цифра, обозначающая материал чувствительного элемента (1 – сернистый свинец, 2 – сернистый кадмий, 3 – селенистый кадмий, 4 – селенистый свинец); третий элемент – цифра, обозначающая порядковый номер разработки.

Фоторезисторы обладают высокой стабильностью параметров.

Конструктивно сопротивления фоточувствительные (СФ) могут быть оформлены в металлоглазанных, пластмассовых корпусах и быть бескорпусными.

Внешний вид некоторых СФ показан на рисунке 13.3.

Основные параметры СФ:

- темновой ток – ток, протекающий через фоторезистор при приложенном рабочем напряжении через 30 с после снятия освещенности 200 лк;

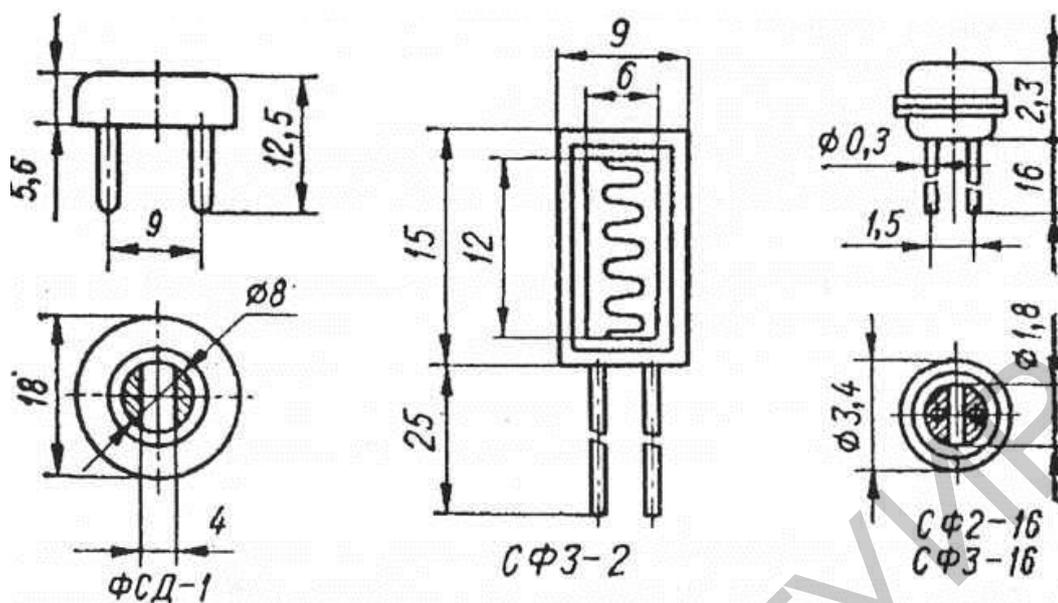


Рисунок 13.3 – Внешний вид некоторых СФ

- наибольшее изменение светового тока по истечении гарантийного срока;
- световой ток – ток, протекающий через фоторезистор при приложенном рабочем напряжении и освещенности 200 лк от источника света с цветовой температурой 2850 К;
- разность между световым и темновым токами называют фототоком;
- температурный коэффициент фототока (I_{Φ}) – изменение фототока при изменении температуры фоторезистора на 1 °С;
- рабочее напряжение – напряжение, которое можно приложить к фоторезистору при длительной эксплуатации без изменения его параметров свыше установленных;
- напряжение собственных шумов – напряжение шумов на фоторезисторе, обусловленное протеканием через него тока и отнесенное к 1 В приложенного напряжения постоянного тока;
- темновое сопротивление – сопротивление фоторезистора при температуре 20 °С через 30 с после снятия освещенности 200 лк;
- кратность изменения сопротивления – отношение темнового сопротивления фоторезистора к его сопротивлению при освещенности 200 лк от источника света с цветовой температурой 2850 К;
- интегральная чувствительность – отношение приращения фототока к величине приращения вызвавшего его светового потока при отсутствии нагрузки и постоянном напряжении на СФ;
- в некоторых случаях указывают значение вольтовой чувствительности в вольтах на люмен; чувствительность измеряют при освещении фоторезистора от источника света с цветовой температурой 2850 К;

- удельная чувствительность K_0 (А/(лм·В)) – отношение фототока к произведению величин падающего на фоторезистор светового потока и приложенного к нему напряжения:

$$K_0 = \frac{I_{\Phi}}{\Phi U_{\Phi}},$$

где I_{Φ} – фототок, А;

Φ – световой поток, лм;

U_{Φ} – напряжение фоторезистора, В;

- пороговая чувствительность – наименьший световой поток, вызывающий появление на фоторезисторе напряжения, вдвое превышающего уровень его шумов;

- постоянная времени – время, в течение которого фототок изменяется в $e = 2,7$ раз при освещении или затемнении фоторезистора по отношению к установившемуся значению; различают постоянную времени по нарастанию и постоянную времени по спаданию;

- время нарастания переднего фронта светового тока составляет 63 % от максимального, время спадания – 37 % от максимального;

- мощность рассеивания – наибольшая допустимая мощность, которую фоторезистор может рассеивать при непрерывной электрической нагрузке и установленной температуре окружающей среды, не изменяя параметров свыше норм, установленных технологическими условиями;

- сопротивление изоляции;

- длина волны, соответствующая максимуму спектральной чувствительности;

- длинноволновая граница.

СФ имеют следующие характеристики:

- ВАХ ($I = f(U)$) – график зависимости светового, темнового или фототока (при постоянном световом потоке (освещенности)) от приложенной разности потенциалов;

- световая характеристика, или ЛАХ, ($I_{\Phi} = f(E)$) – график зависимости фототока от падающего светового потока, или освещенности (при постоянном напряжении на фоторезисторе);

- спектральная характеристика ($I_{\Phi} = f(\lambda)$) – график зависимости фототока от длины волны падающего светового потока (при постоянном напряжении на фоторезисторе);

- частотная характеристика ($I_{\Phi} = f(\nu)$) – график зависимости фототока от частоты модуляции светового потока (при постоянном напряжении на фоторезисторе).

Связь светового потока и освещенности:

$$\Phi = E \cdot S,$$

где Φ – световой поток, падающий на активную часть СФ, лм;

E – освещенность сопротивления фоточувствительного, лк;

S – площадь активной части СФ, м².

13.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя СФ, из справочника выписать его паспортные данные.
- 2 Подсоединить СФ к макету. Включить вилку прибора в сеть (розетку). Включить тумблер прибора СЕТЬ.
- 3 Ручками ГРУБО и ТОЧНО при необходимости изменять напряжение на СФ.
- 4 Ручкой прибора ОСВЕЩЕННОСТЬ при необходимости изменять световой поток, даваемый источниками света.
- 5 С помощью люксметра определить освещенность.
- 6 Сделать измерения и заполнить таблицы 13.1–13.3.
- 7 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

13.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

13.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Материалы, применяемые для изготовления СФ.
- 2 Параметры и характеристики СФ.
- 3 Классификация СФ.
- 4 Корпуса, материалы корпусов.
- 5 Область применения.

Лабораторная работа №14

Исследование основных параметров и характеристик биполярного транзистора

14.1 Цель работы

Изучить структуру и приобрести навыки определения основных параметров и характеристик биполярного транзистора.

14.2 Задание

- 1 Приобрести навыки пользования измерительными приборами.
- 2 Изучить принципиальную электрическую схему макета для маломощных транзисторов *p-n-p*-типа (рисунок 14.1).

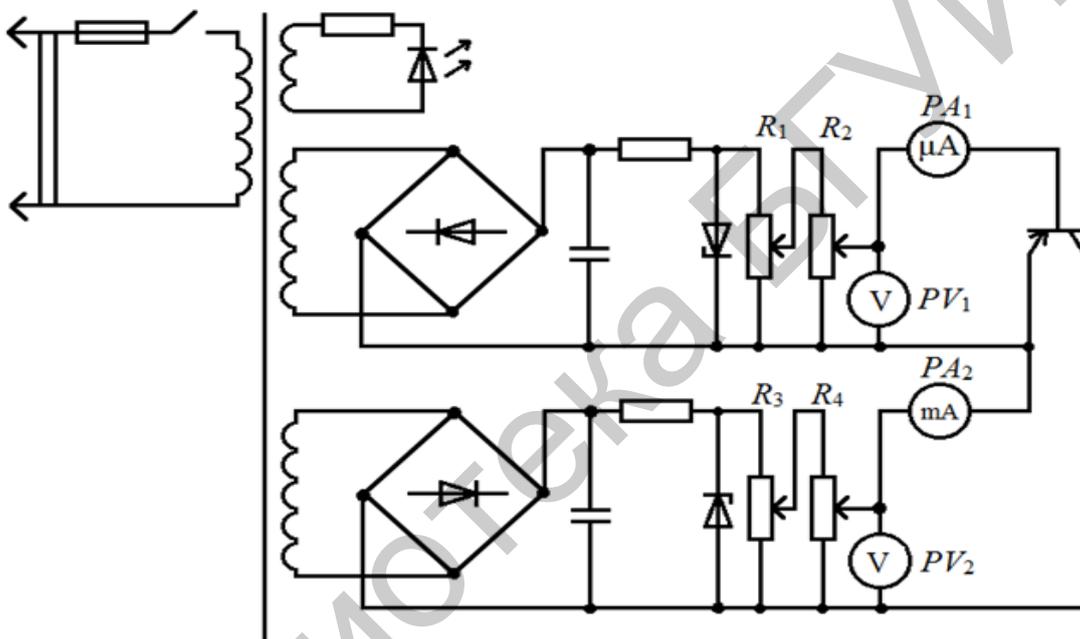


Рисунок 14.1 – Схема электрическая принципиальная макета для изучения биполярного транзистора

3 Получить у преподавателя транзистор, из справочника выписать паспортные данные исследуемого транзистора и зарисовать схему расположения выводов.

4 Снять семейство входных характеристик $I_B = f(U_B)$ для двух значений $U_{КЭ}$ ($U_{КЭ} = \text{const 1}$, $U_{КЭ} = \text{const 2}$) и записать в таблицу 14.1.

Таблица 14.1

Номер опыта	U_B , В	I_B , А	$U_{КЭ}$, В	$U_{КЭ}$, В
1...			const 1	const 2
12				

5 Снять семейство выходных характеристик $I_K = f(U_{КЭ})$ для двух значений I_B ($I_B = \text{const 1}$, $I_B = \text{const 2}$) и записать в таблицу 14.2.

Таблица 14.2

Номер опыта	$U_{КЭ}$, В	I_K , А	I_B , А	I_B , А
1...			const 1	const 2
12				

6 Снять семейство характеристик передачи тока $I_K = f(I_B)$ для двух значений $U_{КБ}$ ($U_{КБ} = \text{const 1}$, $U_{КБ} = \text{const 2}$) и записать в таблицу 14.3.

Таблица 14.3

Номер опыта	I_B , А	I_K , А	$U_{КБ}$, В	$U_{КБ}$, В
1...			const 1	const 2
12				

7 Снять семейство характеристик обратной связи по напряжению $U_B = f(U_{КЭ})$ для двух значений I_B ($I_B = \text{const 1}$, $I_B = \text{const 2}$) и записать в таблицу 14.4.

Таблица 14.4

Номер опыта	$U_{КЭ}$, В	$U_{БЭ}$, В	I_B , А	I_B , А
1...			const 1	const 2
12				

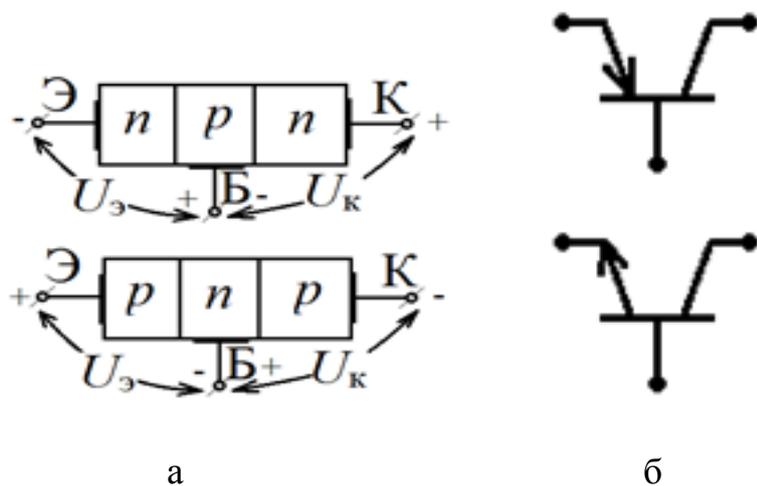
14.3 Оснащение работы

Транзистор, лабораторный макет, соединительные провода, амперметр, вольтметр.

14.4 Основные теоретические сведения

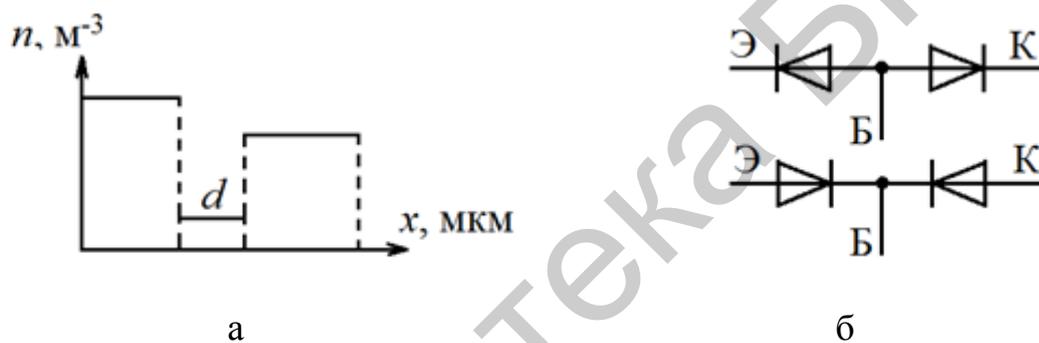
Транзистор – полупроводниковый триод, основу которого составляют три области с чередующимися типами проводимости (эти области разделяются электронно-дырочными переходами (рисунки 14.2 и 14.3)), он служит для усиления мощности, переключения, генерации колебаний и т. д.

Переход на контакте эмиттер – база называется эмиттерным, а на границе база – коллектор – коллекторным. Различают две основные структуры биполярных транзисторов в зависимости от типа проводимости базы. База – это промежуточный слой между эмиттером и коллектором, он служит для управления током, проходящим через транзистор.



а – активные области транзисторов; б – условное графическое обозначение

Рисунок 14.2 – Представление транзистора



а – распределение концентрации основных носителей заряда;
 б – представление транзистора в виде соединенных между собой *p-n*- и *n-p*-структур диодов

Рисунок 14.3 – Представление транзистора в виде структур двух диодов

С учетом объемного заряда транзистор представлен на рисунке 14.4.

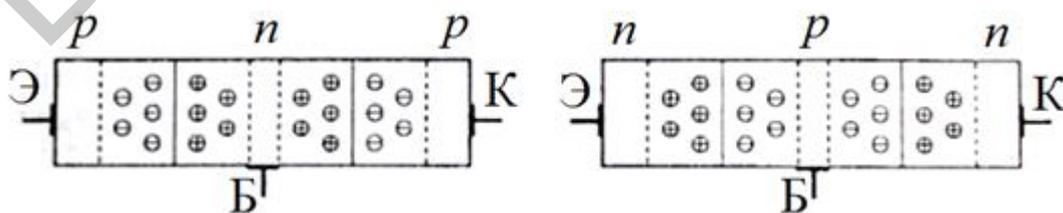


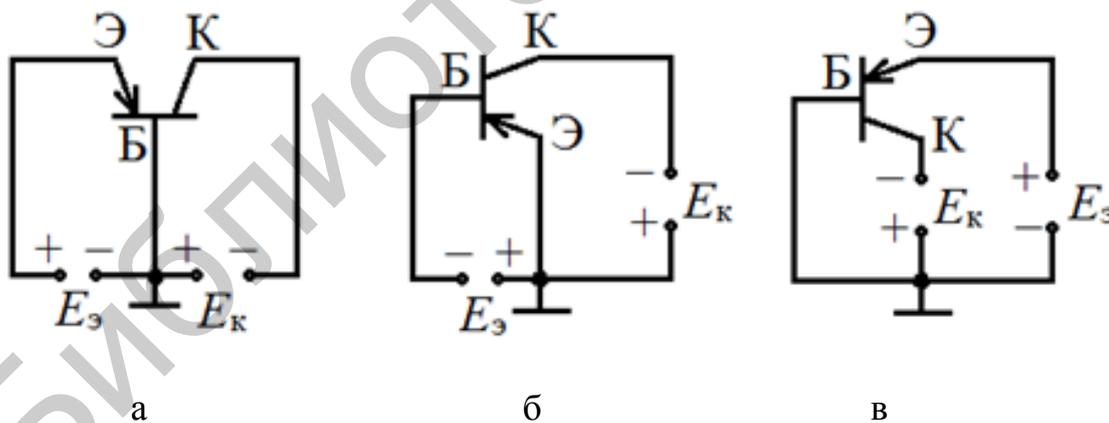
Рисунок 14.4 – Изображение объемного заряда транзистора в структурах областей транзистора

На рисунке 14.5 изображен внешний вид и разрез транзистора.



Рисунок 14.5 – Схематическое изображение внутренней части (а) и разрез структуры (б) транзистора

Различают три способа включения транзистора в схему, с учетом того какой электрод будет общим для входной и выходной цепи (рисунок 14.6): с общей базой (ОБ), с общим коллектором (ОК), с общим эмиттером (ОЭ). Для всех схем включения транзистора *p-n-p*-типа полярность такова, что по отношению к базе эмиттер имеет положительный потенциал, коллектор – отрицательный.



а – с ОБ; б – с ОЭ; в – с ОК

Рисунок 14.6 – Схемы включения транзистора

Различают статический и динамический режимы работы транзистора. В связи с этим существуют статические и динамические характеристики. С учетом схем включения существуют входные, выходные и передаточные характеристики.

14.4.1 Основные параметры и характеристики биполярных транзисторов

Термины, определения и буквенные обозначения биполярных транзисторов установлены ГОСТ 2003–74.

Параметры, относящиеся к физическим свойствам:

- напряжение насыщения коллектор – эмиттер ($U_{КЭ\text{ нас}}$) – напряжение между выводами коллектора и эмиттера в режиме насыщения при заданных значениях токов базы и коллектора;

- напряжение насыщения база – эмиттер ($U_{БЭ\text{ нас}}$) – напряжение между выводами базы и эмиттера в режиме насыщения при заданных токах базы и коллектора;

- граничное напряжение ($U_{КЭ0гр}$) – напряжение между выводами коллектора и эмиттера при токе базы, равном нулю, и заданном токе эмиттера;

- плавающее напряжение эмиттер – база ($U_{ЭБ\text{ пл}}$) – напряжение между выводами эмиттера и базы при заданном обратном напряжении коллектор – база и при токе эмиттера, равном нулю;

- обратный ток коллектора ($I_{К\text{ обр}}$) – ток через коллекторный переход при заданном обратном напряжении коллектор – база и разомкнутом выводе эмиттера;

- обратный ток эмиттера ($I_{Э\text{ обр}}$) – ток через эмиттерный переход при заданном обратном напряжении эмиттер – база и разомкнутом выводе коллектора;

- обратный ток коллектор – эмиттер ($I_{КЭ\text{ обр}}$) – ток в цепи коллектор – эмиттер при заданном обратном напряжении коллектор – эмиттер;

- входное сопротивление в режиме малого сигнала (h_{11}) – отношение изменения напряжения на входе к вызвавшему его изменению входного тока в режиме короткого замыкания по переменному току на выходе транзистора;

- коэффициент обратной связи по напряжению в режиме малого сигнала (h_{12});

- отношение изменения напряжения на входе к вызвавшему его изменению напряжения на выходе в режиме холостого хода во входной цепи по переменному току;

- коэффициент передачи тока в режиме малого сигнала (h_{21}) – отношение изменения выходного тока к вызвавшему его изменению входного тока в режиме короткого замыкания выходной цепи по переменному току;

- модуль коэффициента передачи тока на высокой частоте ($|h_{21Э}|$) в схеме с общим эмиттером в режиме малого сигнала;

- выходная полная проводимость в режиме малого сигнала (h_{22}) – отношение изменения выходного тока к вызвавшему его изменению выходного напряжения в режиме холостого хода входной цепи по переменному току;

- входное сопротивление в режиме входного сигнала ($h_{11Э}$) – отношение напряжения на входе к входному току при заданном постоянном обратном

напряжении коллектор – эмиттер в схеме с общим эмиттером в режиме большого сигнала;

- статический коэффициент передачи тока ($h_{21Э}$) – отношение постоянного тока коллектора к постоянному току базы при заданных постоянном обратном напряжении коллектор – эмиттер и токе эмиттера в схеме с общим эмиттером;

- время задержки ($t_{зд}$) – интервал времени между моментом нарастания фронта входного импульса до значения, соответствующего 10 % его амплитуды, и моментом нарастания фронта выходного импульса до значения, соответствующего 10 % его амплитуды;

- время нарастания ($t_{нр}$) – интервал времени между моментами нарастания фронта выходного импульса от значения, соответствующего 10 % его амплитуды, до значения, соответствующего 90 % его амплитуды;

- время включения ($t_{вкл}$) – интервал времени, являющийся суммой времени задержки и нарастания;

- время выключения ($t_{вык}$) – интервал времени между моментом подачи на базу запирающего импульса и моментом, когда напряжение на коллекторе транзистора достигнет значения, соответствующего 10 % его амплитуды;

- время спада ($t_{сп}$) – интервал времени между моментами спада среза выходного импульса от значения, соответствующего 90 % его амплитуды, до значения, соответствующего 10 % его амплитуды;

- постоянная времени цепи обратной связи на высокой частоте (t_k) – произведение сопротивления базы и активной емкости коллекторного перехода (активная составляющая полной емкости коллекторного перехода высокочастотной эквивалентной схемы транзистора);

- предельная частота коэффициента передачи тока (f_{h21}) – частота, на которой модуль коэффициента передачи тока падает на 3 дБ по сравнению с его низкочастотным значением;

- граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером ($f_{гр}$) – частота, при которой модуль коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером экстраполируется к единице;

- максимальная частота генерации (f_{max}) – наибольшая частота, при которой транзистор способен генерировать в схеме автогенератора;

- емкость эмиттерного перехода ($C_Э$) – емкость между выводами эмиттера и базы при заданных обратном напряжении эмиттер – база и режиме коллекторной цепи;

- емкость коллекторного перехода (C_K) – емкость между выводами коллектора и базы при заданных обратном напряжении коллектор – база и режиме эмиттерной цепи;

- коэффициент шума ($K_{ш}$) – отношение мощности шумов на выходе транзистора к той его части, которая вызвана шумами сопротивления источника сигнала;

- сопротивление базы (r_B) – сопротивление между выводами базы и переходом база – эмиттер.

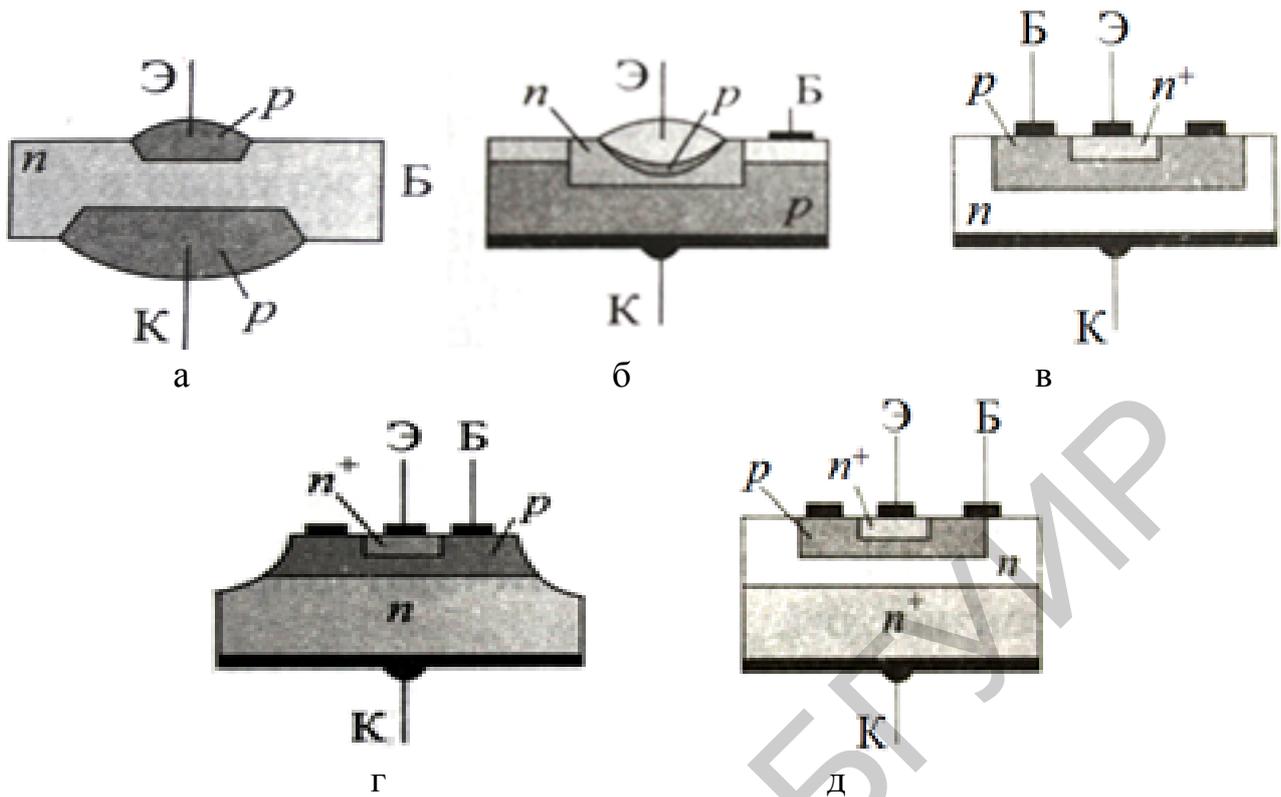
Параметры биполярных транзисторов, относящиеся к режимам работы (измерения) и к максимально допустимым (предельные режимы):

- постоянное напряжение база – эмиттер (максимальное) ($U_{БЭ}$ ($U_{БЭ \max}$));
- постоянное напряжение коллектор – база (максимальное) ($U_{КБ}$ ($U_{КБ \max}$));
- постоянное напряжение коллектор – эмиттер (максимальное) ($U_{КЭ}$ ($U_{КЭ \max}$));
- максимально допустимое импульсное напряжение коллектор – эмиттер ($U_{КЭ \text{ и } \max}$);
- максимально допустимое импульсное напряжение коллектор – база ($U_{КБ \text{ и } \max}$);
- напряжение лавинного пробоя ($U_{\text{п.лав}}$);
- постоянный ток эмиттера (максимальный) ($I_{Э}$ ($I_{Э \max}$));
- постоянный ток базы (максимальный) ($I_{Б}$ ($I_{Б \max}$));
- постоянный ток коллектора в режиме насыщения (максимальный) ($I_{К \text{ нас}}$ ($I_{К \text{ нас } \max}$));
- постоянный ток базы в режиме насыщения (максимальный) ($I_{Б \text{ нас}}$ ($I_{Б \text{ нас } \max}$));
- импульсный ток коллектора (максимальный) ($I_{К \text{ и}}$ ($I_{К \text{ и } \max}$));
- импульсный ток эмиттера (максимальный) ($I_{Э \text{ и}}$ ($I_{Э \text{ и } \max}$));
- максимально допустимый импульсный ток базы ($I_{Б \text{ и } \max}$);
- выходная мощность ($P_{\text{вых}}$) – мощность, которую отдает транзистор в типовой схеме генератора (усилителя) на заданной частоте;
- постоянная мощность рассеяния (максимальная) (P (P_{\max}));
- средняя мощность рассеяния ($P_{\text{ср}}$);
- импульсная мощность рассеяния (максимальная) ($P_{\text{и}}$ ($P_{\text{и } \max}$));
- постоянная мощность рассеяния коллектора (максимальная) ($P_{К}$ ($P_{К \max}$));
- температура среды (максимальная) (t (t_{\max}));
- температура корпуса (максимальная) ($t_{К}$ ($t_{К \max}$));
- температура перехода (максимальная) ($t_{\text{пер}}$ ($t_{\text{пер } \max}$));
- тепловое сопротивление транзистора (R_{tk}) – отношение разности температур между переходом и корпусом к мощности рассеяния на коллекторе в установившемся режиме;
- общее тепловое сопротивление транзистора (R_t) – отношение разности температур между переходом и окружающей средой к мощности рассеяния на коллекторе в установившемся режиме.

Транзисторы бывают дискретные и интегральные.

По технологии изготовления (структуре создания) дискретные биполярные транзисторы делятся на сплавные, планарные, диффузионно-сплавные, мезопланарные, эпитаксиально-планарные (рисунок 14.7).

Структура интегрального биполярного транзистора показана на рисунке 14.8.



а – сплавной; б – диффузионно-сплавной;
 в – диффузионно-планарный; г – мезапланарный;
 д – эпитаксиально-планарный

Рисунок 14.7 – Разновидности структуры дискретных биполярных транзисторов по технологии изготовления

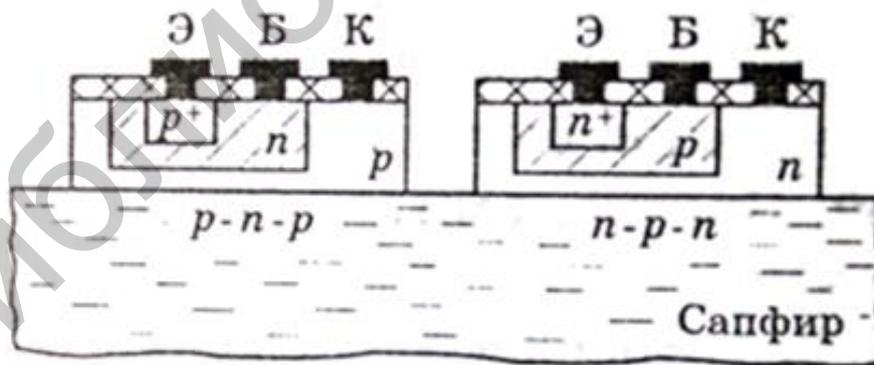


Рисунок 14.8 – Структура интегрального биполярного транзистора $p-n-p$ - и $n-p-n$ -типа

Самой распространенной схемой включения транзистора является схема с ОЭ. Принципиальная схема включения транзистора со структурой $p-n-p$ -типа показана на рисунке 14.9 (полярность источников питания зависит от типа транзистора).

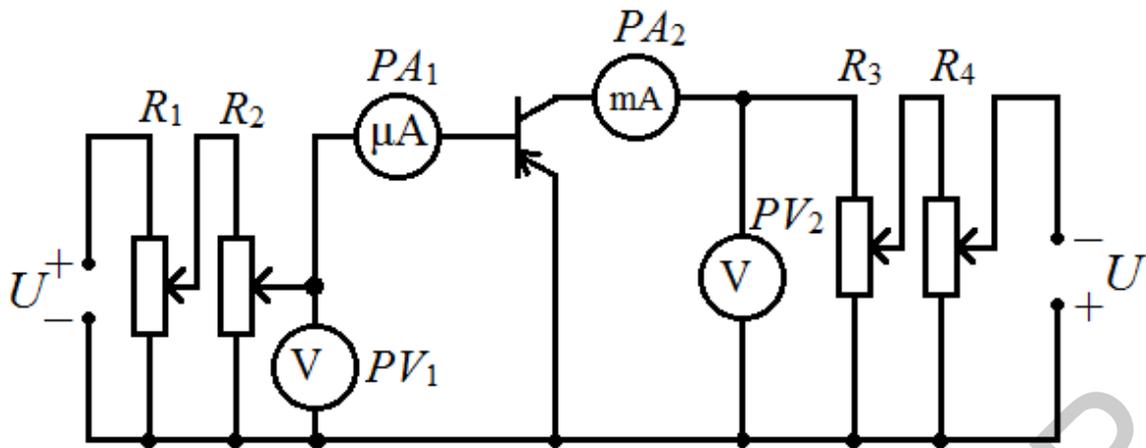


Рисунок 14.9 – Схема электрическая принципиальная включения транзистора с ОЭ

Входные (или эмиттерные) статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ представляют собой зависимость $I_B = f(U_E)$ при $U_K = \text{const}$ (рисунок 14.10).

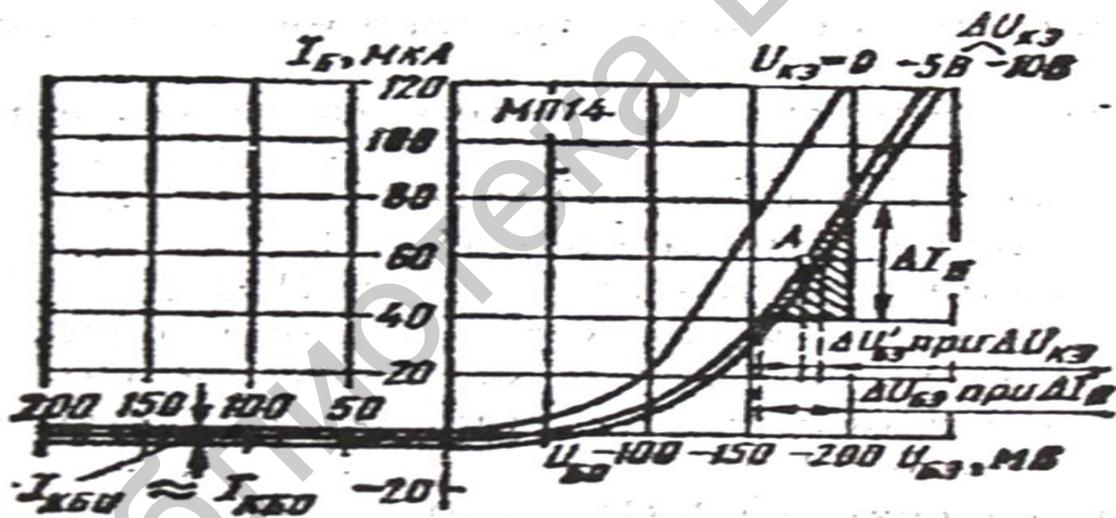


Рисунок 14.10 – Входные статические характеристики транзистора в схеме включения с ОЭ

Выходная статическая характеристика в данном случае – это зависимость $I_K = f(U_K)$ при $U_B = \text{const}$ (рисунок 14.11).

Семейство характеристик передачи тока $I_K = f(I_B)$ – для двух значений U_K , а обратной связи по напряжению $U_B = f(U_K)$ – для двух значений I_B .

Для расчета транзисторных схем можно применять входные и выходные характеристики. По характеристикам транзистора для данного включения при нормальном режиме работы можно вычислить h -параметры ($h_{11Э}$, $h_{12Э}$, $h_{21Э}$, $h_{22Э}$).

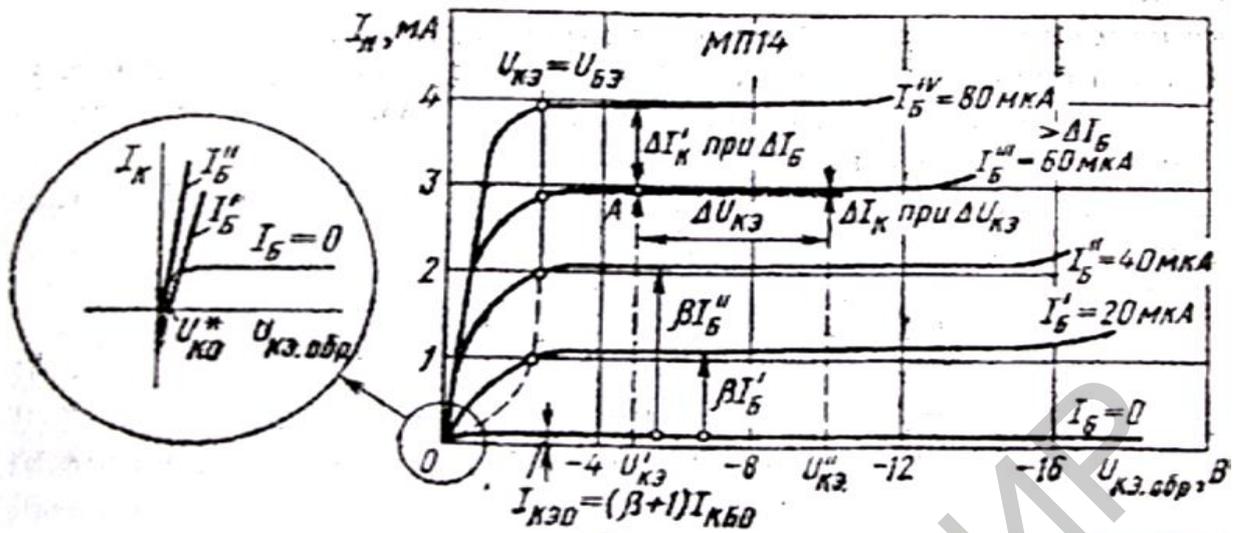


Рисунок 14.11 – Выходные статические характеристики транзистора в схеме включения с ОЭ

Характеристики $h_{э}$ -параметров:

$$h_{11э} = \frac{U_1}{I_1} \text{ при } U_2 = 0; \quad h_{12э} = \frac{U_1}{U_2} \text{ при } I_1 = 0;$$

$$h_{21э} = \frac{I_2}{I_1} \text{ при } U_2 = 0; \quad h_{22э} = \frac{I_2}{U_2} \text{ при } I = 0.$$

Параметры T-образной эквивалентной схемы, вычисленные по $h_{э}$ -параметрам:

$$r_{б} = h_{11э} - (1 + h_{11э}) \frac{h_{12э}}{h_{22э}}; \quad r_0 = \frac{h_{12э}}{h_{22э}}; \quad r_0 = \frac{1 + h_{21э}}{h_{22э}}; \quad \alpha = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}.$$

14.5 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя транзистор, выписать из справочника его паспортные данные, цоколевку выводов (соответствие выводов активным областям транзистора).

2 Подсоединить исследуемый транзистор к макету (см. рисунок 14.1). Заземлить макет. Включить вилку макета в сеть. Включить тумблер СЕТЬ.

3 Выбрать на амперметре и вольтметре нужные пределы измерений.

4 Ручками ГРУБО (резистор R_1), ТОЧНО (резистор R_2) подавать разные значения напряжения на вход, определяя $U_{вх}$ и $I_{вх}$, устанавливая ручками ГРУБО (резистор R_3), ТОЧНО (резистор R_4) определенное (постоянное) значение напряжения или тока на входе.

5 Ручками ГРУБО (резистор R_3), ТОЧНО (резистор R_4) подавать разные значения напряжения на выход $U_{вых}$, устанавливая ручками ГРУБО (резистор R_1), ТОЧНО (резистор R_2) определенные (постоянные) значения напряжения или тока на входе.

- 6 Заполнить таблицы 14.1–14.4 для каждого вида измерений.
- 7 Для заполнения каждой таблицы выполнить 10...12 измерений.
- 8 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

14.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

14.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Что означает слово «транзистор»?
- 2 Область применения транзисторов.
- 3 Типы транзисторов.
- 4 Динамические и статические параметры транзисторов.
- 5 Маркировка транзисторов.
- 6 Материалы, применяемые для изготовления транзисторов.

Лабораторная работа №15

Исследование параметров и характеристик канального транзистора

15.1 Цель работы

Изучить структуру, основные параметры и характеристики канального (полевого) транзистора.

15.2 Задание

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами.
- 2 Изучить схему электрическую принципиальную макета для измерения маломощных канальных транзисторов, приведенную на рисунке 15.1.

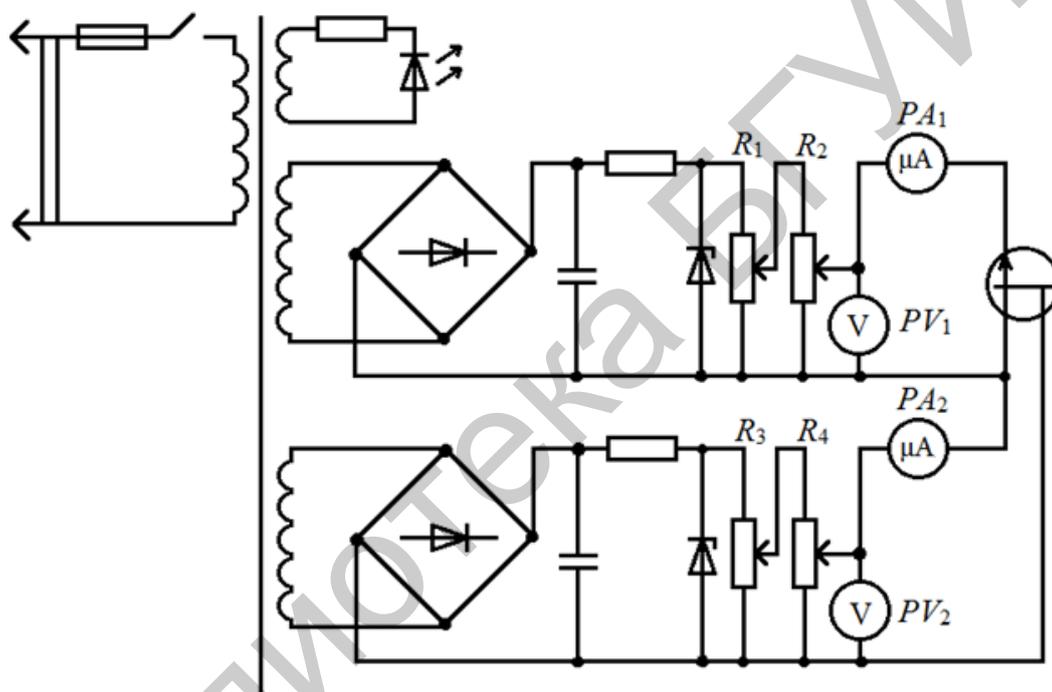


Рисунок 15.1 – Схема электрическая принципиальная макета для изучения канального транзистора

3 Получить у преподавателя полевой транзистор (ПТ), из справочника выписать его паспортные данные и зарисовать схему расположения выводов (цоколевку).

4 Снять семейство стоковых характеристик $I_C = f(U_C)$ для двух значений U_3 и записать в таблицу 15.1.

Таблица 15.1

Номер опыта	$U_C, В$	$I_C, А$	$U_3, В$
1 ...			
12			

5 Снять семейство стоково-затворных характеристик $I_C = f(U_3)$ для двух значений $U_C = \text{const}$ и записать в таблицу 15.2.

Таблица 15.2

Номер опыта	$U_3, \text{В}$	$I_C, \text{А}$	$U_C, \text{В}$
1 ...			
12			

15.3 Оснащение работы

Канальный (полевой) транзистор, макет, соединительные провода, амперметры, вольтметры.

15.4 Основные теоретические сведения

Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, в котором ток изменяется в результате действия перпендикулярного току электрического поля и служит для изменения мощности, переключения, генерации и т. д.

По конструктивным особенностям полевые транзисторы разделяются на две группы: с $p-n$ -переходом (канальные или униполярные) (рисунок 15.2); с изолированными затворами (МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) и МОП (металл – окисел – полупроводник)) (рисунки 15.3, 15.4).

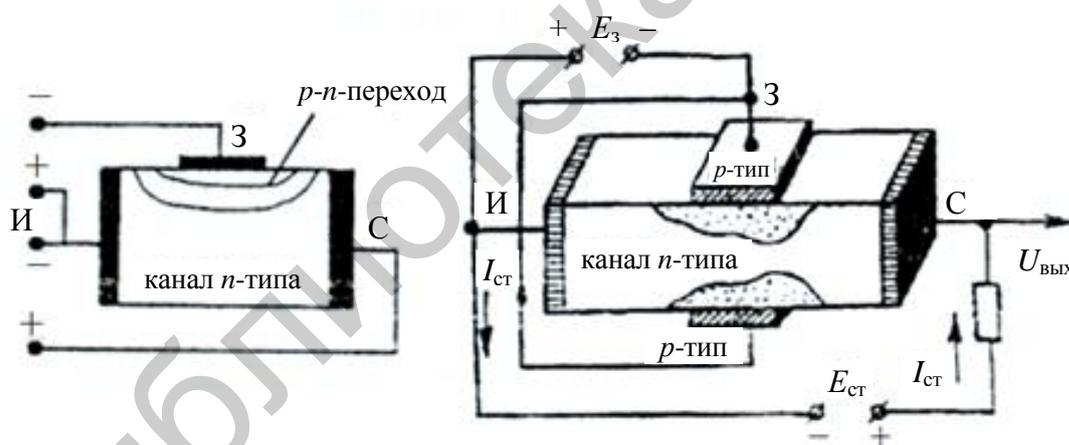


Рисунок 15.2 – Конструкция и схемы включения полевого транзистора с $p-n$ -переходом

Область в полупроводнике, изменением площади поперечного сечения которой регулируется поток основных носителей заряда внутри полевого транзистора, называется каналом.

Принцип действия транзистора с каналом n -типа аналогичен принципу действия транзистора p -типа. Разница заключается лишь в полярности напряжений источников питания. Включается канал в электрическую цепь двумя омическими контактами (электродами), один из которых исток (И), второй –

сток (С). Вывод, подсоединенный к области n -типа (к p - n -переходу), является управляющим электродом – затвором (З). Выводы полевого транзистора соответствуют эмиттеру, базе, коллектору обычного биполярного транзистора.

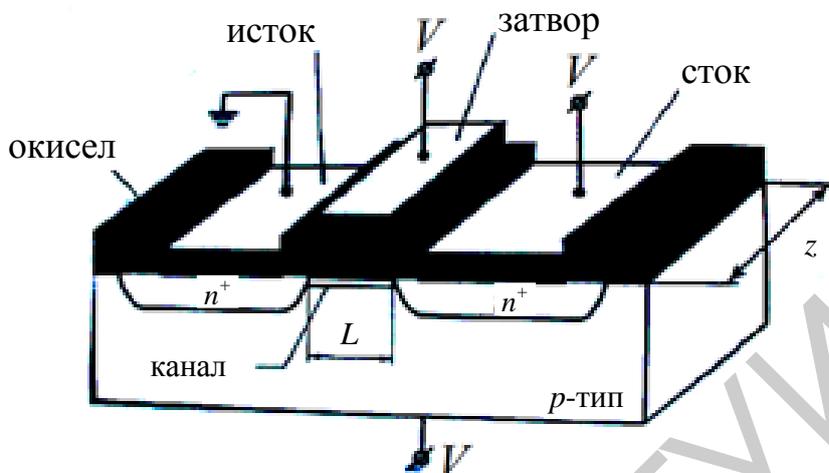


Рисунок 15.3 – Объемная структура планарного МДП-транзистора

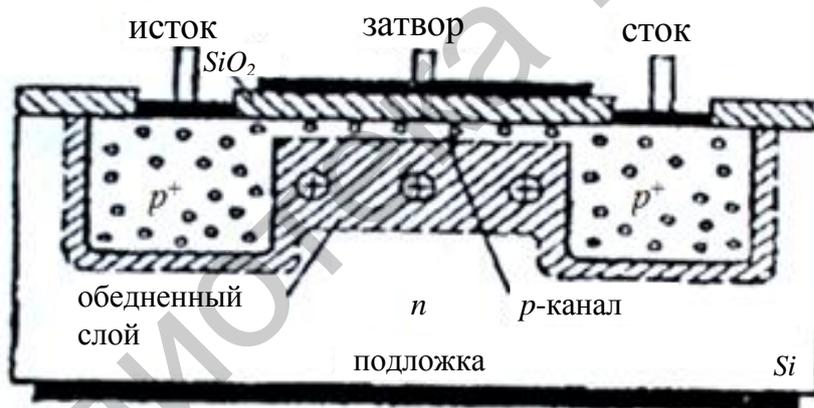


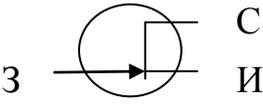
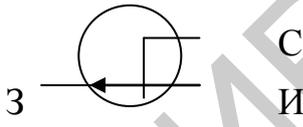
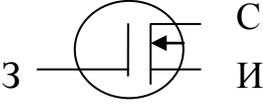
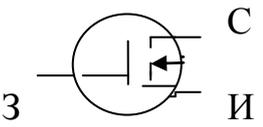
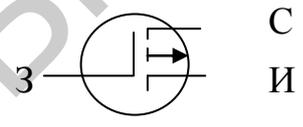
Рисунок 15.4 – Сечение планарного МДП-транзистора

Величина тока зависит от напряжения $U_{СИ}$, приложенного между стоком и истоком, нагрузочного сопротивления R_H и сопротивления полупроводниковой пластины. При $U_{СИ} = \text{const}$ и $R_H = \text{const}$ ток стока I_C зависит только от эффективной площади поперечного сечения канала. Источник E_3 создает отрицательное напряжение на затворе, что приводит к росту толщины p - n -перехода и уменьшению токопроводящего сечения канала. Сопротивление между стоком и истоком увеличивается, а величина тока I_C снижается с уменьшением напряжения на затворе, что уменьшает сопротивление канала, и I_C возрастает. При последовательном подключении к E_3 источника усиленного переменного напряжения $U_{ВХ}$ ток, протекающий через канал, изменяется по закону изменения входного напряжения. Ток стока, проходящий через сопротивление нагруз-

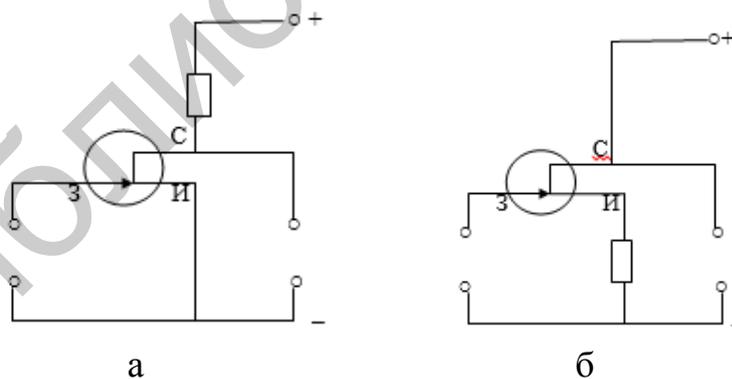
ки R_n , создает падение напряжения, изменяющееся по закону $U_{вх}$. При соответствующем подборе величин можно добиться повышения уровня входного напряжения по сравнению с выходным, т. е. усилить сигнал.

Полевые транзисторы (ПТ) бывают n -, p -канальные и с p - n -переходом (таблица 15.3).

Таблица 15.3

Тип ПТ	Канал	
	n	p
С p - n -переходом		
МОП со встроенным каналом		
МОП с индуцированным каналом		

В зависимости от того, какой электрод подключается к общей точке (или точке постоянного потенциала), различают три схемы включения транзистора: с общим истоком (ОИ) (рисунок 15.5, а), общим стоком (ОС) (рисунок 15.5, б) и с общим затвором (ОЗ). Схема с ОЗ практически не применяется.



а – с ОИ; б – с ОС

Рисунок 15.5 – Схемы включения полевого транзистора

Различают статические и динамические режимы работы ПТ. Следовательно, существуют статические и динамические характеристики, а с учетом включения – входные, выходные и передаточные.

15.4.1 Основные параметры и характеристики полевых транзисторов

Термины, определения и буквенные обозначения полевых транзисторов установлены ГОСТ 2003–74.

Параметры, относящиеся к физическим свойствам:

- напряжение отсечки ($U_{3\text{отс}}$) – напряжение отсечки тока стока при фиксированном напряжении сток – исток;
- напряжение сток – исток ($U_{СИ}$);
- напряжение затвор – исток ($U_{ЗИ}$);
- напряжение затвор – сток ($U_{ЗС}$);
- напряжение между затвором 1 и затвором 2 ($U_{З1-U_{З2}}$);
- напряжение сток – подложка ($U_{СП}$);
- напряжение исток – подложка ($U_{ИП}$);
- начальный ток стока ($I_{С\text{нач}}$) – ток в цепи стока при непосредственном соединении затвора с истоком и заданном напряжении сток – исток;
- ток утечки затвора ($I_{З\text{ут}}$) – ток затвора между затвором и соединенными вместе стоком и истоком постоянного напряжения заданной величины.

Качество оксидной изоляции между затвором и каналом характеризуют:

- крутизна характеристики (S) – отношение изменения тока к изменению напряжения на затворе при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора в схеме с общим истоком;
- входная емкость ($C_{11И}$) – емкость затвор – исток при коротком замыкании по переменному току выходной цепи;
- проходная емкость ($C_{12И}$) – емкость затвор – сток при разомкнутой по переменному току входной цепи;
- выходная емкость ($C_{22И}$) – емкость сток – исток при коротком замыкании по переменному току входной цепи.

15.4.2 Параметры предельных режимов

Максимальное допустимое напряжение:

- затвор – сток ($U_{ЗС\text{max}}$);
- сток – исток ($U_{СИ\text{max}}$);
- затвор – исток ($U_{ЗИ\text{max}}$);
- сток – подложка ($U_{СП\text{max}}$);
- исток – подложка ($U_{ИП\text{max}}$).

Максимальный допустимый ток:

- ток стока ($I_{С\text{max}}$);
- импульсный ток стока ($I_{С\text{и}\text{max}}$);
- прямой ток затвора ($I_{З\text{пр}\text{max}}$).

Кроме указанных, применяют также общие для транзисторов параметры: $I_{ИС\text{max}}$, P_{max} и др.

Структура интегрального ПТ показана на рисунке 15.6.

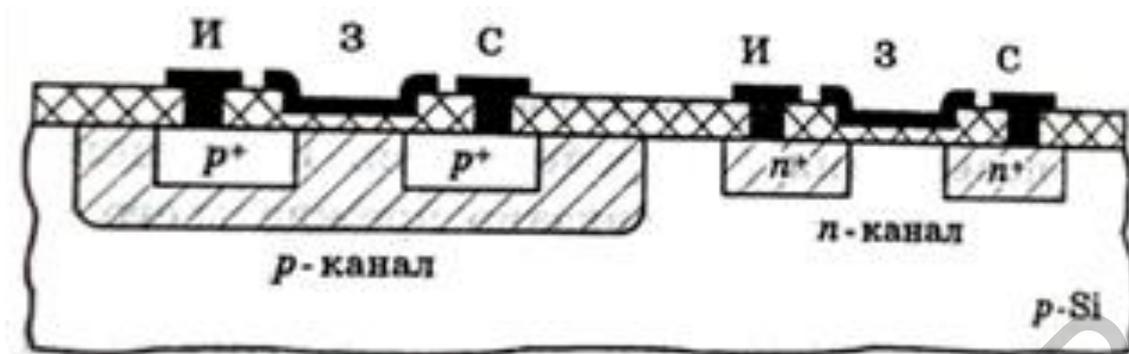


Рисунок 15.6 – Структура МОП-транзистора с *n*- и *p*-каналами

Самой распространенной схемой включения ПТ с *p*-каналом является схема с общим истоком. Принципиальная схема имеет вид, представленный на рисунке 15.1 (полярность источников зависит от типа канала транзистора).

Стоковые характеристики канального транзистора

$$I_C = f(U_C) \text{ при } U_3 = \text{const.} \quad (15.1)$$

Стоково-затворные характеристики канального транзистора

$$I_{ИС} = f(U_3) \text{ при } U_C = \text{const.} \quad (15.2)$$

По характеристикам транзистора (15.1) для данного включения при нормальном режиме работы можно определить: напряжение насыщенного стока $U_{Cн}$; ток насыщения транзистора $I_{Cн}$ при $U_3 = 0$ и $U_C = U_{Cн}$; выходное сопротивление транзистора $R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_C}{\Delta I_C}$; сопротивление канала R_{K0} при $U_3 = 0$ и $U_C = 0$.

По характеристикам (15.2) можно определить: напряжение отсечки $U_3 \text{ отс}$; максимальную крутизну характеристики канального транзистора $S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_C}$ при $U_C = U_{ИС}$.

15.5 Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя транзистор, из справочника выписать его паспортные данные, цоколевку.

2 Подсоединить исследуемый транзистор к макету. Заземлить макет. Включить вилку макета в сеть. Включить тумблер СЕТЬ.

3 Выбрать на амперметре и вольтметре нужные пределы измерений.

4 Ручками ГРУБО (резистор R_1), ТОЧНО (резистор R_2) подавать разные значения напряжения на вход, определяя $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$, устанавливая ручками ГРУБО (резистор R_3), ТОЧНО (резистор R_4) определенные значения напряжения или тока на выходе.

5 Ручками ГРУБО (резистор R_3), ТОЧНО (резистор R_4) подавать разные значения напряжения на выход U , устанавливая ручками ГРУБО (резистор R_1), ТОЧНО (резистор R_2) определенные значения напряжения или тока на входе.

6 Для каждого случая выполнить 10...12 измерений. Заполнить таблицы 15.1 и 15.2.

7 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

15.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа №__

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

15.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Что обозначает понятие «канальный (полевой) транзистор»?
- 2 Отличия канального транзистора от биполярного транзистора.
- 3 Структура канального транзистора.
- 4 Схемы включения канальных транзисторов.
- 5 Характеристики канальных транзисторов.
- 6 Режим работы канальных транзисторов.

Лабораторная работа №16
Определение коэффициента теплопроводности
твёрдых тел (проводников)

16.1 Цель работы

Изучить основные методы определения коэффициента удельной теплопроводности.

16.2 Задание

Первый метод

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами.
- 2 Собрать электрическую схему согласно рисунку 16.1.

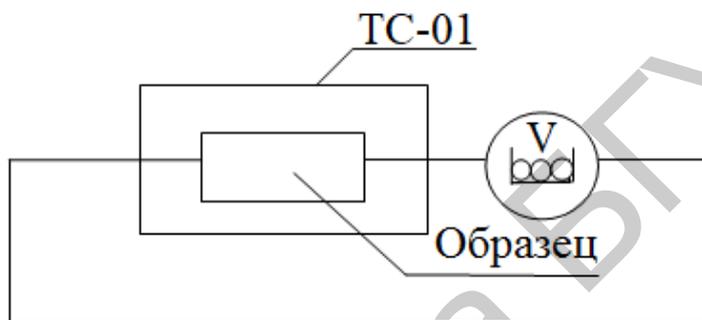


Рисунок 16.1 – Структурная схема соединения приборов и образца

- 3 Выписать паспортные данные приборов.
- 4 Измерить линейные размеры образца.
- 5 Выставить на термостате определенное значение температуры.
- 6 При заданной температуре произвести замер сопротивления R_1 .
- 7 Повторно выставить температуру T_2 и произвести замер сопротивления R_2 .
- 8 Данные измерений записать в таблицу 16.1.

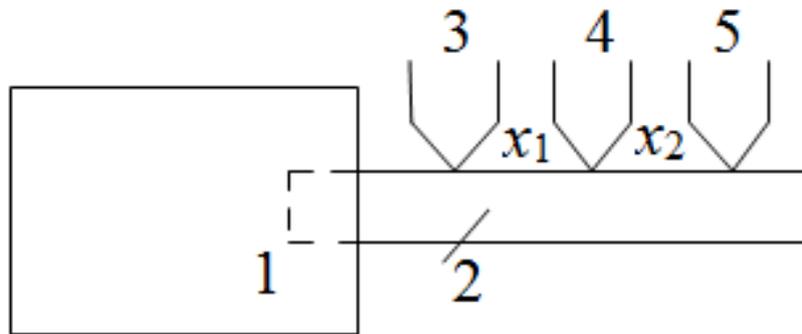
Таблица 16.1

Номер опыта	R , Ом	l , м	$l_1 \cdot l_2$, м	σ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	T , К	λ , Вт/(м·К)
1 ...						
12						

Второй метод

- 1 Изучить макет.
- 2 Собрать электрическую схему макета (рисунок 16.2).
- 3 Записать паспортные данные приборов.
- 4 Измерить расстояние между термопарами.

- 5 Установить на муфеле определенное значение температуры T_1 .
 6 Через каждые 30...60 с произвести замеры температур термоэлектрическими термометрами.



1 – муфель; 2 – образец; 3, 4, 5 – термопары; x_1, x_2 – расстояние между термопарами, с помощью которых можно определить температуру

Рисунок 16.2 – Структурная схема соединения приборов и образца в макете

- 7 Выставить на муфеле значение температуры T_2 .
 8 Через каждые 30...60 с провести замеры температур термоэлектрическими приборами (термопарами).
 9 Данные измерений записать в таблицу 16.2.

Таблица 16.2

Номер опыта	T_1, K	T_2, K	$x_1, \text{м}$	$x_2, \text{м}$	T_3, K	T_4, K	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\lambda_{\text{ср}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
1 ...								
12								

16.3 Оснащение работы

Образец, термостат ТС-01, цифровой вольтметр типа В7-53, мост постоянного или переменного тока, микроскоп МИР-2, микрометр или штангенциркуль, секундомер.

16.4 Основные теоретические сведения

Первый метод

Передача тепловой энергии от нагретого тела к менее нагретому, от нагретой части образца к менее нагретой передается различными методами, одним из которых является метод, основанный на явлении теплопроводности.

Предположим, имеется образец, в котором одна сторона имеет температуру T_1 , а вторая – T_2 , причем $T_1 > T_2$, длина образца l (рисунок 16.3). В данном

случае имеется градиент температуры, т. е. $\frac{\Delta T}{\Delta l}$, поток тепловой энергии ΔQ , Дж, будет направлен слева направо в образце и равен

$$\Delta Q = \lambda \cdot \Delta t \cdot S \frac{\Delta T}{\Delta l},$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·с);

Δt – время прохождения теплового потока, с;

S – площадь сечения образца, м²;

$\frac{\Delta T}{\Delta l}$ – градиент температуры, К/м.

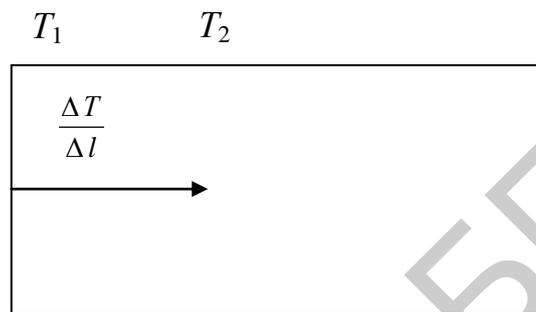


Рисунок 16.3 – Изображение потока тепла в образце

Коэффициент теплопроводности – величина, численно равная количеству тепла, протекающего через поперечное сечение в единицу времени, при единичном градиенте температуры. Поток распространяемого тепла приводит к тому, что температура образца увеличивается и образец можно характеризовать коэффициентом линейного расширения α и объемного расширения β , т. е.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \Delta T}, \text{ или } l_t = l(1 + \alpha \Delta T),$$

где Δl – изменение длины образца, м;

l – первоначальное значение длины образца, м;

ΔT – изменение температуры образца, К;

α – температурный коэффициент линейного расширения образца, 1/К;

l_t – длина нагретого образца, м.

$$\beta = \frac{\Delta V}{V \Delta T}, \text{ или } V_t = V(1 + \beta \Delta T),$$

где ΔV – изменение объема образца, м³;

V – первоначальное значение объема образца, м³;

ΔT – изменение температуры образца, м³;

β – температурный коэффициент объемного расширения образца, 1/К;

V_t – конечный объем нагретого образца, м³.

Нагреваемый образец характеризуется теплоемкостью, удельной теплоемкостью, атомной, или молярной, теплоемкостью, т. е.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}; C_{\text{уд}} = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}; C_{\text{ат}} = \frac{\Delta Q}{\mu\Delta T},$$

где ΔQ – изменение тепловой энергии, Дж;

ΔT – изменение температуры, К;

m – масса образца, кг;

μ – молярная (атомная) масса данного образца, моль (n_2).

На практике необходимо определить коэффициент теплопроводности. Существуют различные способы его определения. Рассмотрим один из них.

Согласно законам термодинамики, тепло распространяется от нагретой части к холодной и обусловлено наличием градиента dT/dx температуры. Тепловой поток переносится как электронами и ионами, так и атомами кристаллической решетки. Тепловой поток характеризуется электронной и решетчатой составляющей. Электронная составляющая на 2...3 порядка больше решетчатой составляющей теплопроводности, поэтому ею можно пренебречь.

Электроны обуславливают перенос тепла и удельную проводимость σ , $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$:

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu,$$

где n – концентрация носителей заряда – число носителей заряда в единице объема, м^{-3} ;

e – величина заряда, Кл;

μ – подвижность носителей заряда – величина, численно равная скорости движения заряда при единичной напряженности $E = 1$ В/м электронного поля, $\mu = U/E$, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Согласно закону Видемана – Франца, существует связь между удельной проводимостью и коэффициентом удельной теплопроводности:

$$\lambda = \sigma \cdot L_0 \cdot T,$$

где λ – численное количество, равное энергии, передаваемой образцом на единицу длины в единицу времени при градиенте температуры $dT/dx = 1$, при изменении температуры на 1° , через единичную площадь, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

σ – удельная проводимость, величина, обратная удельному сопротивлению, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$;

$$\sigma = \frac{1}{\rho}; \rho = R \frac{S}{l}; \sigma = \frac{1}{R} \frac{l}{S};$$

$L_0 = 2,4 \cdot 10^{-8} = l/3\pi^2 (k/e)^2$ – постоянная Лоренца, $\text{В}^2/\text{К}^2$;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

e – величина заряда, Кл;

T – температура образца по шкале Кельвина, К.

Второй метод

Процесс распространения тепла в твердом теле, т. е. процесс теплопроводности описывает уравнение Фурье, которое имеет следующий вид (при условии, что c , ρ , λ – постоянны в данном образце):

$$c \cdot \rho \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) + F,$$

где c – теплоемкость образца, Дж/К;

ρ – плотность образца, кг/м³;

$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t}$ – 1-я производная по времени от температуры T образца, т. е.

скорость распределения температуры;

λ – коэффициент теплопроводности;

$\left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right)$ – сумма производных 2-го порядка

по координатам;

F – потоки тепла тепловых источников.

Если для упрощения предположить, что образец имеет форму цилиндра (провода), то уравнение можно записать так:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + F.$$

После некоторых предположений и преобразований получим уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

а после некоторых упрощений и с определенной долей достоверности – решение, которое характеризует распределение температуры вдоль образца:

$$T = T_0 e^{-\frac{\lambda t}{c \rho x^2}},$$

где T – температура в искомой точке образца, К;

T_0 – температура в начальной точке образца, К;

e – основание натурального логарифма.

Решая уравнение для различных соседних точек образца, получим

$$\lambda = \frac{c \rho (\ln T x_1 - \ln T x_2)}{\left(\frac{t_2}{x_2^2} - \frac{t_1}{x_1^2} \right)}, \text{ или } \lambda = \frac{c \rho \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 (\ln T x_1 - \ln T x_2)}{t_2 \cdot x_1^2 - t_1 \cdot x_2^2},$$

где t – время, с;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·град);

ρ – плотность вещества, кг/м³;

x – расстояние от первоначальной точки до конечной, в которой определяется температура, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

16.5 Порядок выполнения работы

Первый метод

- 1 Получить у преподавателя образец.
- 2 Подсоединить исследуемый образец к клеммам крышки термостата с внутренней стороны.
- 3 Вход цифрового вольтметра (измерение сопротивления) подсоединить к клеммам камеры термостата.
- 4 Включить вилки приборов в сеть.
- 5 Включить тумблер СЕТЬ.
- 6 Ручкой термостата установить нужную температуру нагрева.
- 7 При данной температуре произвести измерение сопротивления образца.
- 8 Выполнить измерения 12 раз и данные измерений записать в таблицу 16.1.

Второй метод

- 1 Получить у преподавателя образец.
- 2 Определить по справочнику удельную теплоемкость c и плотность ρ образца. Вставить образец в муфель. Привести в контакт термопары. Включить вилки приборов в сеть. Включить тумблер СЕТЬ.
- 3 Включить муфель на некоторое время, определяемое секундомером. Зная расстояния x_1 и x_2 (или измерив их) и задавая температуру муфеля, получить данные, которые записать в таблицу 16.2.
- 4 Через определенные промежутки времени определить значение температуры в точках 1, 2, 3.
- 5 Выполнить измерения 12 раз и данные измерений и вычислений записать в таблицу 16.2.
- 6 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

16.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

16.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Что такое сопротивление? Единицы измерения.
- 2 Что такое удельная проводимость? Единицы измерения.

- 3 Что такое коэффициент теплопроводности?
- 4 Теория Друде.
- 5 Физический смысл постоянной Лоренца.
- 6 Что обозначает понятие «фонон»?
- 7 Как температура влияет на проводимость проводников?

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №17

Исследование основных параметров лазера

17.1 Цель работы

Изучить конструкцию и принцип действия твердотельного лазера (типа ЛПИ-12), а также изучить основные параметры лазера.

17.2 Задание

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами, макетом.
- 2 Изучить схему макета (рисунок 17.1).

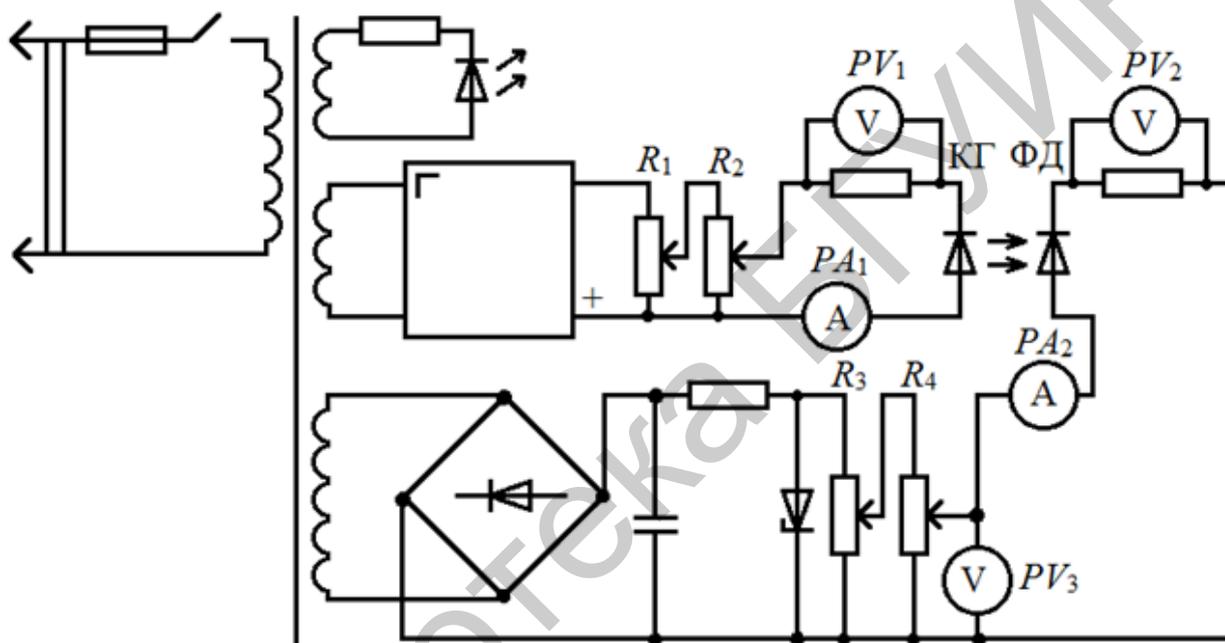


Рисунок 17.1 – Схема электрическая принципиальная макета для изучения лазера

- 3 Изменяя расстояние между светящимися пятнами, определить радиусы светящихся пятен r_1 и r_2 . Данные измерений записать в таблицу 17.1.

Таблица 17.1

Номер опыта	l , м	r_1 , м	r_2 , м	φ , рад	φ_C , рад
1 ...					
12					

- 4 Изменяя U_1 при $U_3 = \text{const}$ и $f = \text{const}$, определить U_2 . Данные измерений записать в таблицу 17.2.

- 5 Изменяя частоту генератора при $U_3 = \text{const}$ и $U_1 = \text{const}$, определить U_2 . Данные измерений записать в таблицу 17.3.

Таблица 17.2

Номер опыта	$U_1, В$	$I_1, А$	$U_2, В$	$I_2, А$	$U_3, В$	$f, Гц$
1 ...					const	const
12						

Таблица 17.3

Номер опыта	$U_1, В$	$I_1, А$	$U_2, В$	$I_2, А$	$U_3, В$	$f, Гц$
1 ...	const				const	
12						

17.3 Оснащение работы

Лазер, фотоприемник, макет, вольтметры, микроскоп МИР-2, оптическая скамья.

17.4 Основные теоретические сведения

Лазер – прибор (устройство), генерирующий когерентное излучение на основе эффекта вынужденного стимулированного излучения. Лазер (от начальных букв английских слов *light amplification by stimulated emission of radiation*) – усиление света с помощью вынужденного излучения. Лазеры находят широкое применение в науке и технике: спектроскопии, локации, обработке материалов, энергетике, оптическом приборостроении, медицине и т. д.

Лазеры классифицируются по следующим параметрам:

- 1) виду активной среды: газовые, твердотельные, жидкостные;
- 2) виду взаимодействия: непрерывного действия, импульсные;
- 3) мощности: маломощные, мощные, сверхмощные.

Структурная схема лазера представлена на рисунке 17.2.



Рисунок 17.2 – Структурная схема лазера

Обозначение лазера (генератора квантового оптического) на электрических схемах показано на рисунке 17.3.

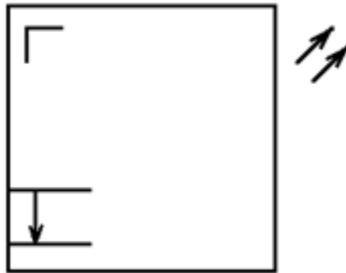


Рисунок 17.3 – Условное графическое обозначение лазера на электрических схемах

Пространственно-временные параметры лазеров:

- частота лазерного излучения – средняя частота спектра лазерного излучения;
- ширина линии лазерного излучения – расстояние между точками контура спектральной линии лазерного излучения, соответствующее половине интенсивности линии в максимуме;
- расходимость лазерного излучения – плоский или телесный угол, характеризующий угловое распределение энергии или мощности лазерного излучения;
- время готовности лазера – время, необходимое для достижения лазером эксплуатационных параметров с момента его включения.

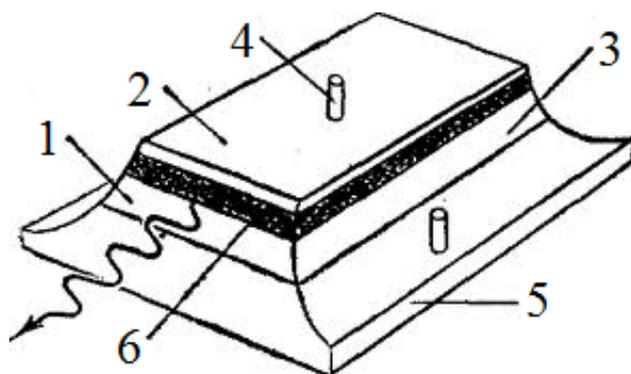
Энергетические параметры лазеров:

- энергия лазерного излучения показывает энергетические возможности лазера;
- мощность лазерного излучения характеризует интенсивность излучаемой энергии лазером, концентрацию энергии во времени;
- КПД – отношение энергии или средней мощности, излучаемой лазером, соответственно к энергии или средней мощности, подводимой к лазеру;
- порог генерирования лазера.

17.4.1 Инжекционные лазеры

Первые инжекционные лазеры были созданы на GaAs. Типичный лазер на GaAs изготавливается в форме параллелепипеда с длинами сторон от долей миллиметра до миллиметра (рисунок 17.4).

Две боковые грани служат зеркалами оптического резонатора лазера. Показатель преломления GaAs достаточно большой: от полированных торцов, не имеющих дополнительного покрытия, отражается порядка 35 % излучения. Две другие торцевые грани, перпендикулярные плоскости *p-n*-перехода, немного скошены. Это сделано для исключения генерации между данными гранями.



1 – полированные торцевые поверхности; 2 – *p*-область; 3 – *n*-область; 4 – выводы; 5 – молибденовая пластина, покрытая золотом; 6 – область *p-n*-перехода

Рисунок 17.4 – Схематическое изображение конструкции инжекционного лазера

При низких температурах лазер на GaAs может работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме, а при комнатной температуре – только в импульсном. Процесс возникновения генерации в лазере зависит от плотности тока инжекции. Когда плотность тока инжекции достигает некоторой пороговой величины, выполняется условие инверсной заселенности, что влечет за собой установление режима генерации излучения. При этом происходит резкое сужение спектральной характеристики излучения (рисунок 17.5) и улучшается диаграмма направленности излучения (рисунок 17.6).

В инжекционных лазерах значение пороговой плотности тока достигает 10 кА/см^2 (при $T = 300 \text{ К}$). Работа лазера очень зависит от температуры, изменение которой ведет к сдвигу спектра излучения полупроводникового лазера, увеличению пороговой плотности тока. Эти явления связаны с двумя факторами: изменением показателя преломления материала и сдвигом вершины люминесценции.

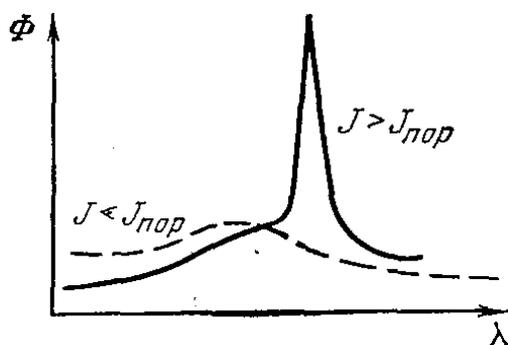


Рисунок 17.5 – Распределение интенсивности направленности излучения

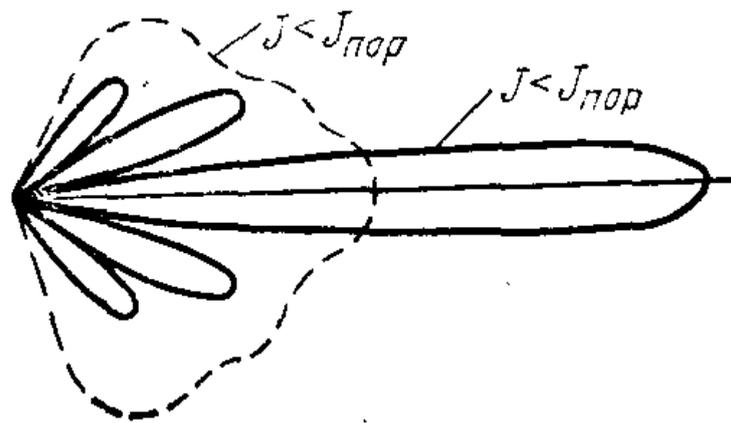


Рисунок 17.6 – Диаграмма излучения в зависимости от длины волны

Достоинства инжекционных лазеров:

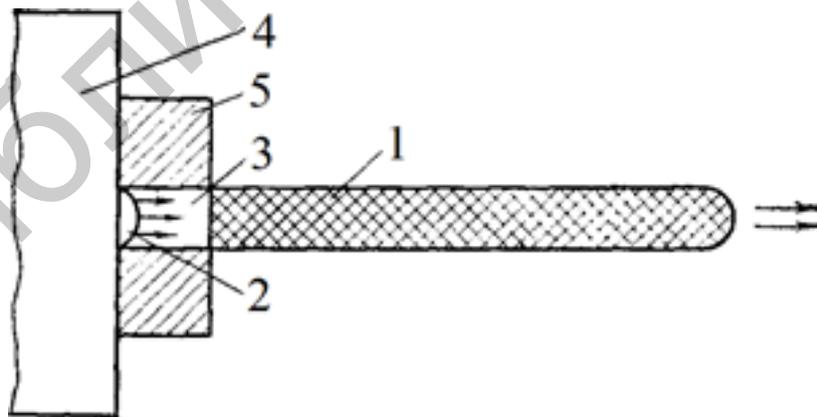
- малые габариты (до 0,1 см);
- высокий КПД (до 20 %);
- малое напряжение питания (от 1,5 до 3 В).

Недостатки инжекционных лазеров:

- большой угол расходимости (до 10°);
- низкая степень когерентности.

17.4.2 Твердотельные лазеры

Твердотельные лазеры (рисунок 17.7) в качестве активной среды содержат кристаллический или аморфный диэлектрик, имеющие центры люминесценции.



- 1 – стержень активного вещества; 2 – ИК-диод; 3 – оптическая среда;
4 – теплоотвод; 5 – фиксирующая оправка

Рисунок 17.7 – Схематическое изображение конструкции твердотельного лазера

Примером малогабаритного оптоэлектронного твердотельного лазера является лазер на иттриево-алюминиевом гранате, в кристаллической решетке которого часть атомов иттрия замещена ионами иодима. Эти кристаллы обладают высокой прочностью и теплопроводностью, однородностью оптофизических параметров. Для создания когерентного излучения используется оптическая накачка.

Стержень активного вещества с отполированными зеркальными торцами (оптический резонатор) освещается лампой непрерывного действия или лампой-вспышкой.

Светособирающая система обеспечивает равномерную освещенность поверхности стержня и минимальный его нагрев. Благодаря такой концентрации активных центров, энергия когерентного излучения оказывается в десятки раз больше, чем у других типов лазеров. Однако современные элементы системы оптической накачки имеют низкую долговечность, что снижает надежность лазера в целом. В качестве ИК-диода в основном используются диоды на GaAs, имеющие длину волны максимум порядка 810 нм. Совпадение частот резонанса лазера и излучения ИК-диода приводит к повышению КПД.

Достоинства твердотельных лазеров:

- небольшие габариты (до 1 см);
- высокий КПД (до 20 %).

Недостатки твердотельных лазеров:

- небольшая степень когерентности;
- большое напряжение питания (до 1 кВ).

Оптические полупроводниковые квантовые генераторы – лазерные диоды – характеризуются:

- расходимостью лазерного излучения;
- мощностью (интенсивностью) излучения;
- спектром излучения.

17.4.3 Волоконно-оптические линии связи

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) включают в себя следующие основные элементы: входное кодирующее устройство (КУ), передатчик, оптический кабель, ретранслятор (Р), приемник, выходное декодирующее устройство (ДКУ) (рисунок 17.8).

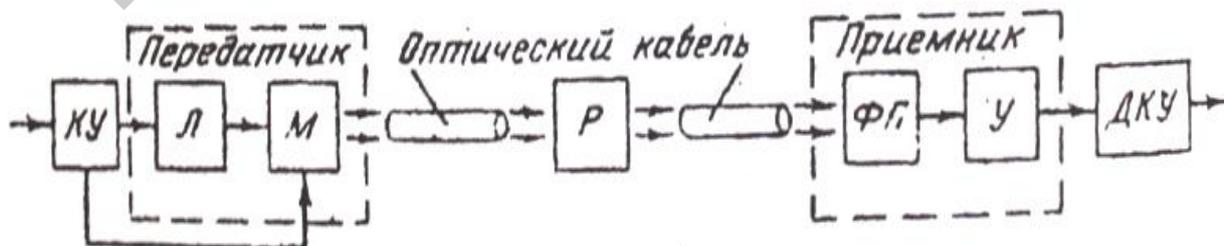


Рисунок 17.8 – Структурная схема ВОЛС

Кодирующее устройство преобразует исходную информацию в форму, удобную для передачи. Главная часть передатчика – обычно полупроводниковый лазер (Л). Закодированная в электрическом сигнале информация поступает на модулятор (М), который управляет интенсивностью излучения лазера. Модулированный оптический сигнал передается далее по оптическому кабелю. В месте приема с помощью фотоприемника (ФП) оптический сигнал будет вновь преобразован в электрический и усилен в усилителе слабых сигналов (У). Ретранслятор служит для восстановления уровня сигнала, передаваемого на большие расстояния.

Рассмотренные структуры ВОЛС позволяют выделить их основные отличительные особенности:

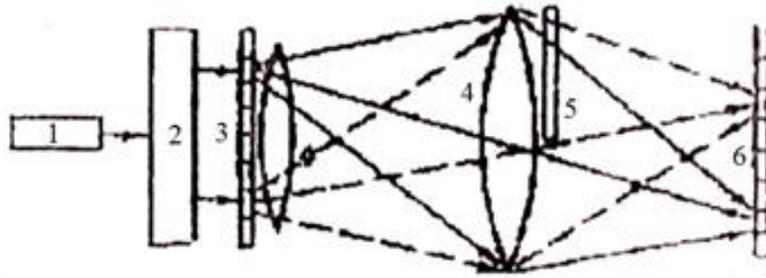
- высокую помехоустойчивость от внешних электромагнитных воздействий и от межканальных взаимонаводок;
- малые габариты и масса из-за низкой плотности всех используемых материалов и отказа от тяжелых экранирующих оболочек;
- широкий диапазон рабочих частот (до 1 ГГц): по одной линии оптической связи может одновременно передаваться 10^{10} телефонных разговоров или 1 млн телепередач;
- секретность передачи информации: излучение в окружающее пространство ВОЛС практически отсутствует, а изготовление отводов оптической энергии без разрушения кабеля практически невозможно;
- потенциально низкая стоимость, обусловленная как заменой дорогостоящих цветных металлов, так и простотой изготовления, прокладки и эксплуатации ВОЛС.

17.4.4 Голографические системы хранения и записи информации

Голография – это способ регистрации и последующего восстановления световых волн. В основе принципа голографии лежит интерференция когерентных волн: волны, отраженной от объекта, и некоторой вспомогательной (опорной) когерентной волны. Фиксируя на фотоприемнике интерференционную картину, получающуюся при сложении двух когерентных волн, записывают полную информацию (амплитудно-фазовую) об отраженной от объекта волне. Полученную картину называют голограммой. Для восстановления изображения объекта голограмму освещают опорной световой волной. При этом происходит дифракция опорной волны на интерференционной картине и исходная волна полностью восстанавливается.

Дефлектор 2 (рисунок 17.9) направляет лазерный луч (сплошная линия) на голограмму вспомогательной матрицы 3. После голограммы возникнут две волны: одна, пройдя через линзу 4, попадает на голограмму запоминающей матрицы 6 – это опорная волна; другая – пространственно-модулированная – также попадает на голограмму запоминающей матрицы – это сигнальная волна.

Пунктиром показан путь лучей в случае считывания другой голограммы. Схема считывания содержит: лазер 1, дефлектор 2, запоминаящую матрицу 3, систему линз 4, матрицу пространственно-временной модулятор 5, матрицу фотоприемников 6.

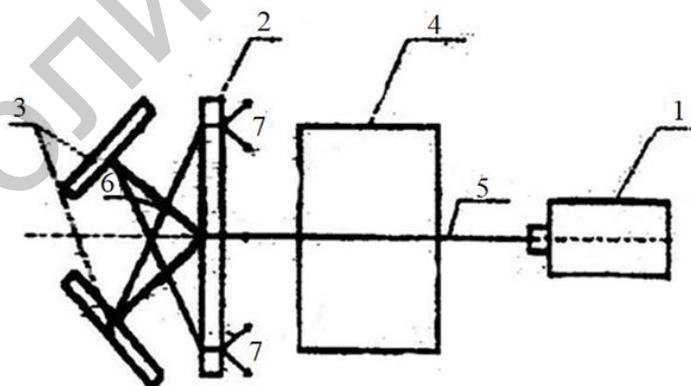


1 – лазер; 2 – дефлектор; 3 – вспомогательная матрица голограмм;
4 – собирающие линзы; 5 – пространственно-временной модулятор;
6 – запоминаящая матрица голограмм

Рисунок 17.9 – Принцип получения голографического изображения

17.4.5 Измерение малых перемещений с помощью лазера

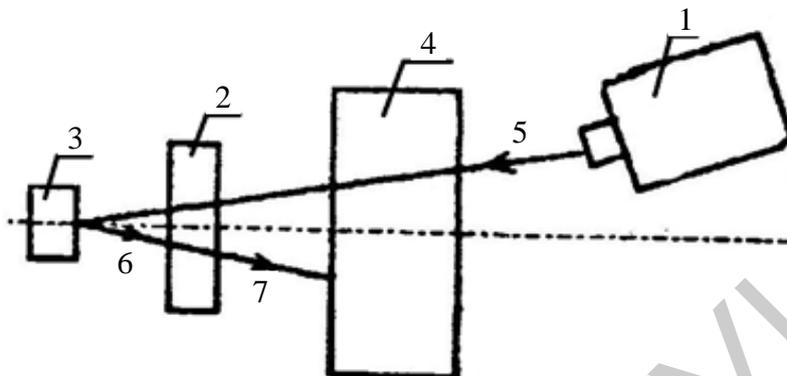
Метод измерения перемещений с помощью лазера нашел применение в технике, науке и производственном оборудовании для выпуска микросхем, где требуется высокая степень совмещения. Измерение перемещений осуществляется с помощью датчиков линейных перемещений (рисунок 17.10). Основу датчика составляет лазерный излучатель 1, сюда же входят прозрачная дифракционная решетка 2, уголкового отражателя 3 и фотоэлектрический преобразователь 4. Конструктивно сюда не входит блок питания.



1 – лазерный излучатель; 2 – прозрачная дифракционная решетка;
3 – уголкового отражатель; 4 – фотоэлектрический преобразователь;
5 – луч лазерного излучателя

Рисунок 17.10 – Датчик линейных перемещений

Луч 5 He-Ne-лазера 1 (рисунок 17.11) после телескопического расширителя проходит сквозь отверстие фотоэлектрического преобразователя 4 и под углом 42° относительно горизонтали попадает на прозрачную дифракционную решетку 2, потом на отражатель 3, отраженный луч 6 попадает на дифракционную решетку 2, а после нее – на преобразователь 4.



1 – He-Ne-лазер; 2 – прозрачная дифракционная решетка; 3 – отражатель; 4 – фотоэлектрический преобразователь; 5 – луч лазера; 6 – отраженный луч

Рисунок 17.11 – Ход световых лучей

Дифракция лазерного луча на решетке приводит к его расщеплению на ряд пучков, расходящихся под разными углами в горизонтальной плоскости. Эти углы могут быть рассчитаны по формуле

$$d \cdot \sin \varphi = n \cdot \lambda,$$

где d – шаг дифракционной решетки, мкм;

n – порядок дифракции;

λ – длина волны He-Ne-лазера ($\lambda = 0,63$ мкм).

В данной установке в качестве рабочих лучей используются лучи 6, расходящиеся под углом приблизительно 18° . Эти лучи попадают на зеркальные поверхности уголкового отражателя 3, отражаются и возвращаются на дифракционную решетку. После повторной дифракции лучей снова образуется набор новых пучков, распространяющихся в разных направлениях. Из этих пучков только два поступают в фотоэлектрический преобразователь. Практически эти два пучка наложены друг на друга и образуют один выходной пучок 7, идущий под углом 42° к горизонтали и $1^\circ 24'$ к падающему пучку 5. Выходной пучок 7 содержит информацию о перемещении муаровых интерференционных полос, образованных при наложении двух упомянутых пучков.

Конструктивно дифракционная решетка укреплена на подвижном координатном столике. При ее перемещении перпендикулярно биссектрисе угла уголкового отражателя происходит смещение муаровых полос, причем перемещению полос на один период соответствует смещение решетки 1 мкм. Для удобства наблюдения муаровой картины на матовой бумаге используется микроскоп.

Фотоэлектрический преобразователь предназначен для преобразования светового пучка с муаровой картины, несущего информацию о перемещении, в квадратурные сигналы.

Расходимость определяется по формуле

$$\varphi = \arctg \frac{r_2 - r_1}{l},$$

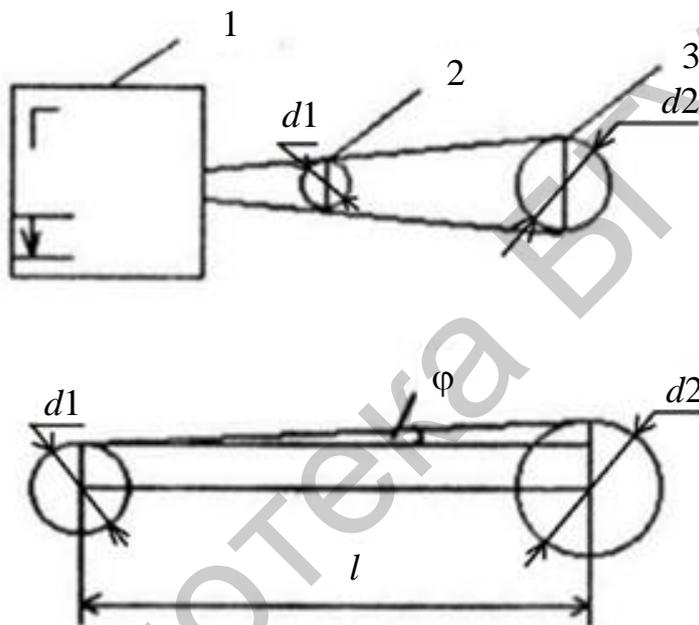
где φ – угол расхождения, рад.

r_1 – радиус светящегося пятна вблизи лазера, м;

r_2 – радиус светящегося пятна на удалении, м;

l – расстояние от одного светящегося пятна до другого, м;

Схема измерения расходимости лазерного излучения приведена на рисунке 17.12.



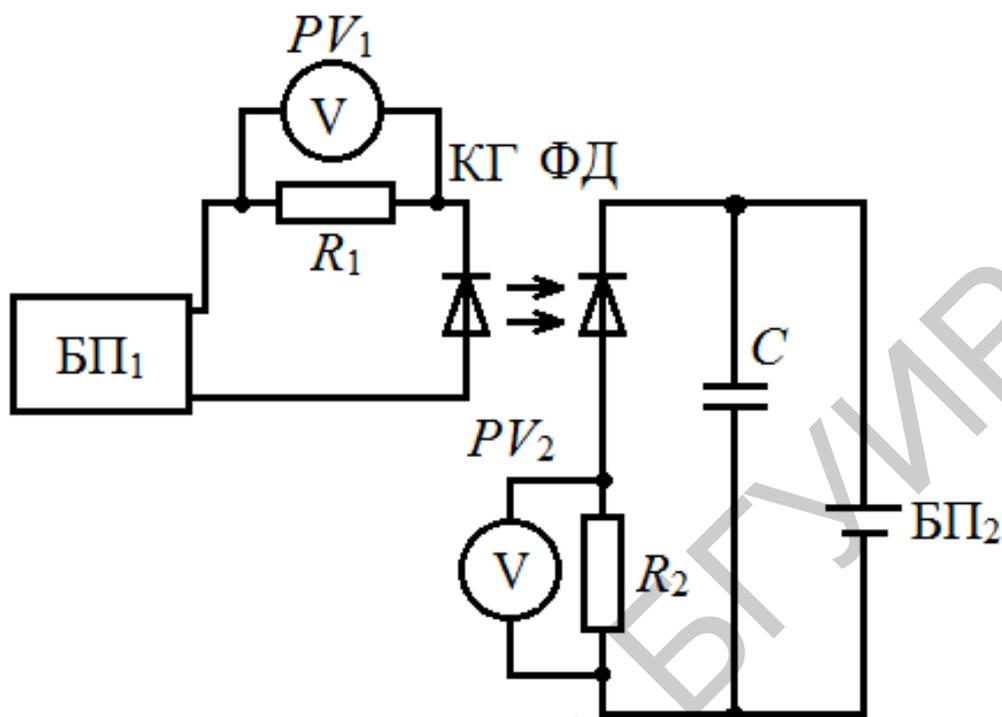
- 1 – полупроводниковый лазер; 2 – светящееся пятно на экране возле лазера;
3 – светящееся пятно на экране на удалении от лазера

Рисунок 17.12 – Определение расходимости лазерного излучения

На рисунке 17.13 приведена схема измерения параметров и определения мощности (интенсивности) лазерного излучения.

Изуемый лазерный диод подключен к импульсному блоку питания в прямом направлении, при этом ток достигает десятков ампер. Прохождение такой величины тока вызывает возбуждение лазерного диода, возникает световой импульс. Падение напряжения на резисторе R_1 определяется импульсным вольтметром V_1 . Периодические импульсы импульсного диода (ИД) когерентного типа вызывают периодическое изменение тока в цепи фотодиода. Импульсный вольтметр V_2 будет определять падение напряжения на резисторе R_2 . Шкалу вольтметра можно проградуировать в единицах мощности (интенсивности).

При этом необходимо учитывать спектральную совместимость лазерного диода и фотодиода.



БП₁ – импульсный блок питания; БП₂ – блок питания смещения;
 КГ – квантовый генератор, лазерный диод; ФД – фотодиод;
 PV₁, PV₂ – импульсные вольтметры; R₁, R₂ – нагрузка;
 C – блокировочный конденсатор

Рисунок 17.13 – Схема электрическая принципиальная макета для определения мощности излучения лазерных диодов

Плотность тока накачки i , А/м², можно определить по формуле

$$i = \frac{I_n}{S},$$

где I_n – ток накачки, А;

S – площадь p - n -перехода, м².

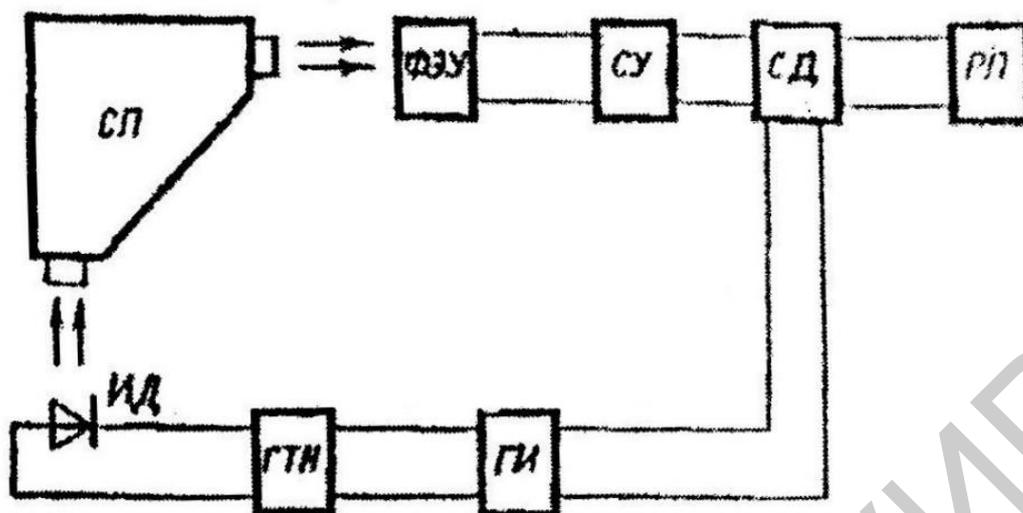
Показания регистрирующего прибора (РП) будут зависеть от длины волны излучения. Можно получить спектральную зависимость мощности излучения от длины волны:

$$P_n = f(\lambda),$$

где P_n – мощность излучения, Вт;

λ – длина волны излучения, м.

Схема определения спектра излучения лазерного диода приведена на рисунке 17.14.



СП – спектрограф; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;
 СУ – селективный умножитель; СД – синхронный детектор;
 РП – регистрирующий прибор; ЛД – лазерный диод;
 ГТН – генератор тока накачки; ГИ – генератор импульсов

Рисунок 17.14 – Функциональная схема макета для измерения спектра излучения ИД

17.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя лазер, выписать из справочника его паспортные данные.
- 2 Собрать электрическую цепь согласно полученному заданию. Заземлить приборы. Включить вилки приборов в сеть. Включить тумблеры СЕТЬ.
- 3 Выбрать на приборах соответствующие пределы измерений.
- 4 Выполнить измерения 12 раз.
- 5 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

17.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № _____
 Номер учебной группы _____
 Фамилия, инициалы обучающегося _____
 Дата выполнения работы _____
 Тема работы: _____
 Цель работы: _____
 Задание: _____
 Оснащение работы: _____
 Результаты выполнения работы: _____

17.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Что такое лазер?
- 2 Параметры лазера.
- 3 Характеристики лазера.
- 4 Типы лазеров.
- 5 Конструкция полупроводникового лазера.
- 6 Область применения лазеров.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №18

Определение концентрации носителей заряда в полупроводниках с помощью эффекта Холла

18.1 Цель работы

Изучить основные методы определения концентрации носителей заряда в сильнолегированных полупроводниках или металлах.

18.2 Задание

- 1 Освоить навыки пользования измерительными приборами.
- 2 Собрать электрическую цепь согласно рисунку 18.1.
- 3 Изучить схему электрическую принципиальную макета для исследования эффекта Холла и определения некоторых параметров и характеристик датчика Холла (рисунок 18.1).

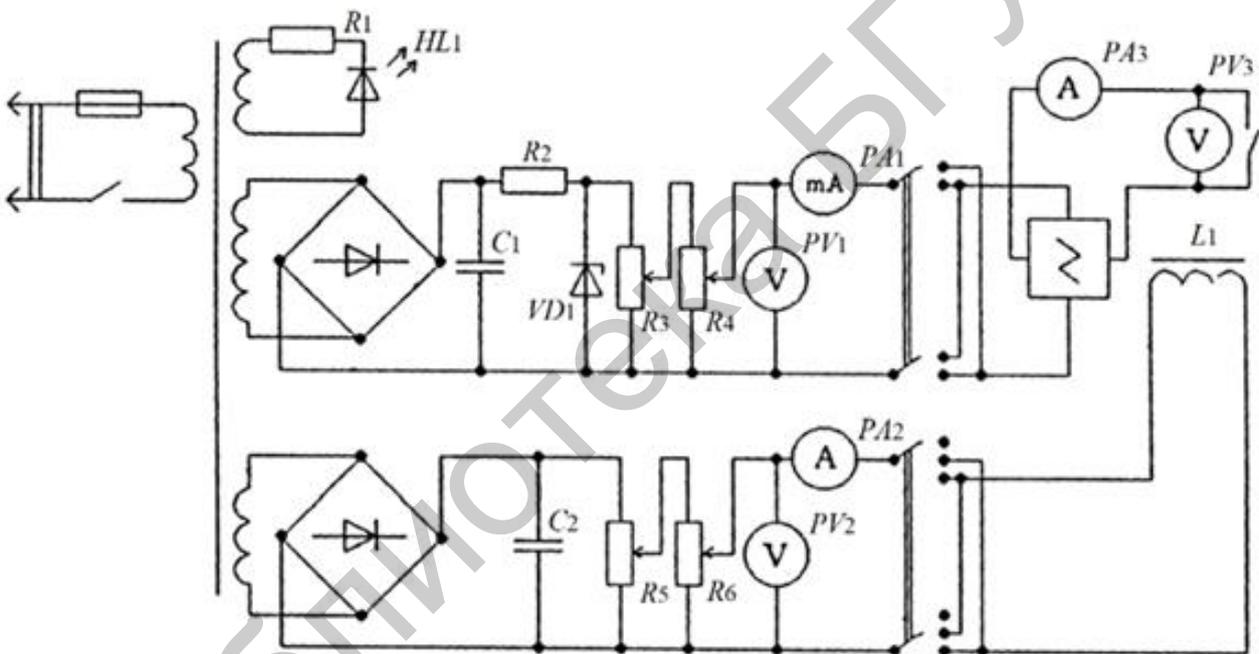


Рисунок 18.1 – Схема электрическая принципиальная макета для изучения эффекта Холла

- 4 Определить параметры B и H .
- 5 Провести измерения и данные записать в таблицу 18.1.

Таблица 18.1

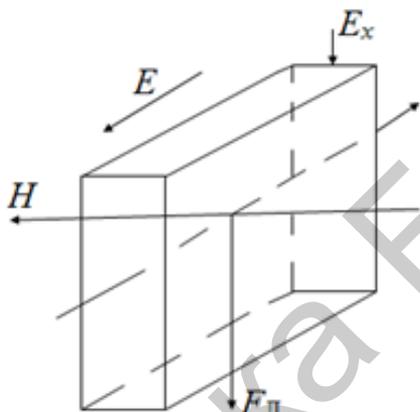
Номер опыта	I , А	U , В	R , $\text{м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$	d , м	H , А/м	B , Тл	n , м^{-3}	$n_{\text{ср}}$, м^{-3}
1 ...								
12								

18.3 Оснащение работы

Потенциометр (высокоомный или низкоомный) или вольтметр типа В7-53, миллиамперметр, баллистический гальванометр, реостат, соединительные провода, образцы материалов (закрепленные в плексиглас, выводы выведены на клеммы), постоянный магнит, милливеберметр, нормальный источник постоянного тока.

18.4 Основные теоретические сведения

Если металлическую пластину в виде параллелепипеда, по которой протекает электрический ток, поместить в магнитное поле, направленное перпендикулярно линиям тока, то в ней возникает разность потенциалов в направлении, перпендикулярном электрическому току и магнитному полю (эффект Холла) (рисунок 18.2).



E – направление напряженности электрического поля;

V – направление скорости электронов под действием электрического поля;

H – направление напряженности магнитного поля;

F_L – направление силы Лоренца, действующей на электрон

Рисунок 18.2 – Схематическое изображение явления эффекта Холла

В основе эффекта Холла лежит явление, когда на каждую заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = e \cdot [\vec{V} \cdot \vec{B}],$$

где \vec{F} – вектор силы Лоренца, Н;

e – заряд электрона, Кл;

\vec{V} – вектор скорости движения частицы, м/с;

\vec{B} – вектор индукции магнитного поля, Тл.

Под действием силы Лоренца электроны будут оттесняться к одной стороне пластины (в данном случае к нижней пластине (см. рисунок 18.1)), заряжая ее отрицательно, а противоположная ей сторона зарядится положительно, т. к. на ней будет меньше электронов. Поперек пластины возникает разность потенциалов U_x , В (ЭДС Холла):

$$U_X = R \frac{I \cdot B}{d},$$

где R – постоянная Холла, $\text{м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$;

I – величина тока, протекающего через образец, А;

B – индукция магнитного поля, Тл;

d – толщина образца вдоль напряженности магнитного поля, м.

В том случае, когда имеется один тип проводимости (носителей заряда),

$$R = \frac{A}{n \cdot b}.$$

Коэффициент A зависит от механизма рассеяния носителей заряда и типа кристаллической решетки, температуры. Для упрощения, с определенной долей достоверности, можно предположить, что $A = 1$. Тогда

$$R = \frac{I}{n \cdot e},$$

где n – концентрация электронов, м^{-3} ;

e – заряд электрона, Кл.

Зная удельную проводимость и постоянную Холла, можно определить подвижность носителей заряда μ , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, в проводниках:

$$\mu = \sigma \cdot R,$$

где σ – удельная проводимость, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

R – постоянная Холла, $\text{м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$.

С учетом значения постоянной Холла

$$U_X = \frac{I}{n \cdot e} \cdot \frac{I \cdot B}{d},$$

а с учетом того, что $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$,

$$U_X = \frac{I}{n \cdot e} \cdot \frac{I \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot H}{d},$$

где μ – относительная магнитная проницаемость ($\mu \approx 1$ будем условно считать для германия и кремния), безразмерная величина;

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;

H – напряженность магнитного поля, А/м.

Проделав эксперимент, выполнив измерения и вычисления, из вышеописанного равенства нетрудно определить концентрацию носителей заряда:

$$n = \frac{I}{U_X \cdot e} \cdot \frac{I \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot H}{d}.$$

Постоянная Холла полупроводников с носителями заряда обоих знаков имеет вид

$$R = \frac{I}{n \cdot e} \cdot \frac{\mu_p^2 \cdot p - \mu_n^2 \cdot n}{(\mu_p \cdot p + \mu_n \cdot n)^2},$$

где μ_p – подвижность дырок, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;

μ_n – подвижность электронов, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$;

p – концентрация дырок, м^{-3} ;

n – концентрация электронов, м^{-3} .

Направление U_x зависит от направления движения носителей заряда (направления напряженности электрического поля), знака носителей заряда, направления индукции (напряженности) магнитного поля.

С помощью баллистического гальванометра и миллиамперметра определяется знак потенциалов и направления E_x и E (электрического поля), а с помощью магнитной стрелки – направление H (сначала определить, где северный и южный полюсы магнита). С учетом направления векторов \vec{H} , \vec{E} , \vec{E}_x и при помощи рисунка 18.3 можно определить тип проводимости полупроводника.

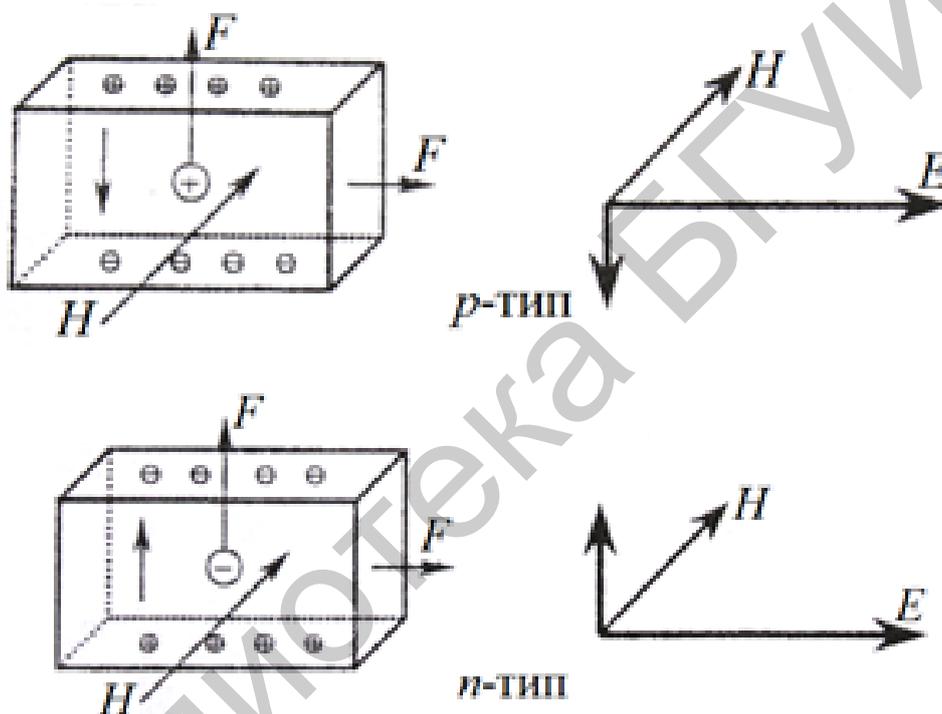
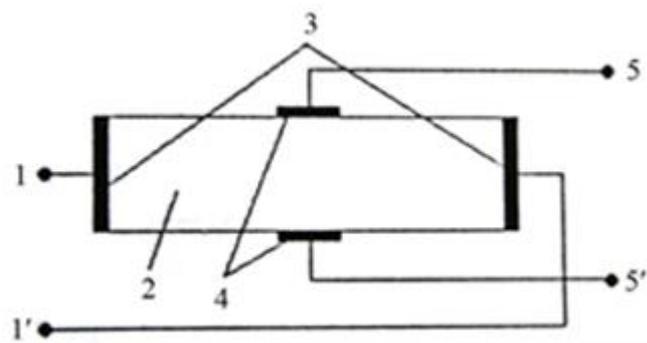


Рисунок 18.3 – Направления векторов \vec{H} , \vec{E} , \vec{E}_x и силы Лоренца F_L , действующей на заряды

На эффекте Холла основан принцип работы следующих приборов: датчика Холла, магниторезистора, магнитодиода, магнитотранзистора и др.

18.4.1 Датчики Холла

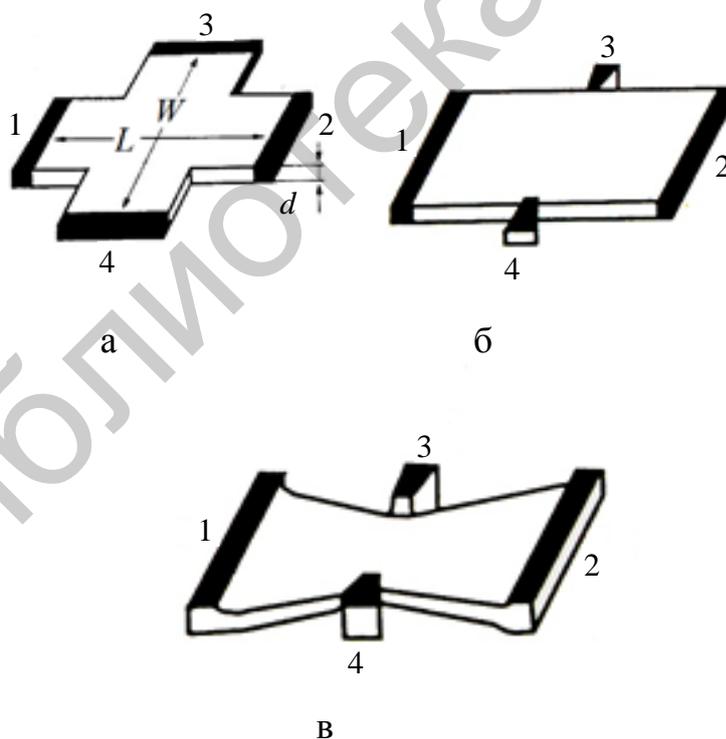
Датчиком (преобразователем) Холла является полупроводниковая пластина с проводящими металлическими электродами и присоединенными к ним проводами, принцип действия которой основан на использовании эффекта Холла (рисунок 18.4)



- 1 и 1' – выводы входа датчика; 2 – полупроводниковая пластина;
 3 – металлизация для присоединения входных выводов;
 4 – металлизация для присоединения выходных выводов;
 5 и 5' – выводы выхода датчика

Рисунок 18.4 – Схематическое изображение активной части датчика Холла

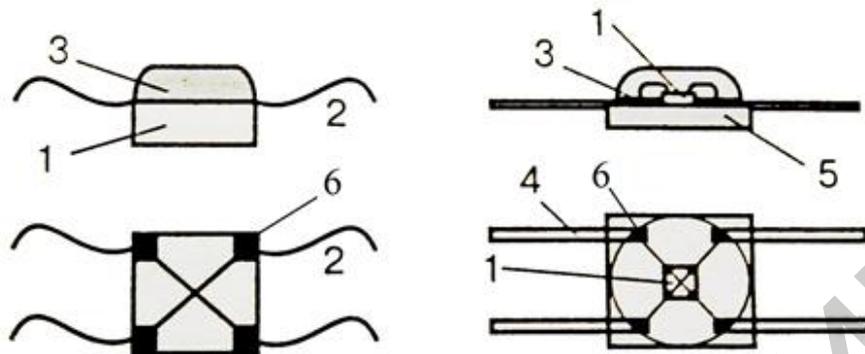
Магниточувствительный элемент преобразователя Холла может быть изготовлен с использованием любой современной технологии микроэлектроники. На рисунке 18.5 рассмотрены варианты топологии элементов Холла.



- а – «крест»; б – «прямоугольник»; в – «бабочка»;
 1, 2, 3, 4 – омические контакты

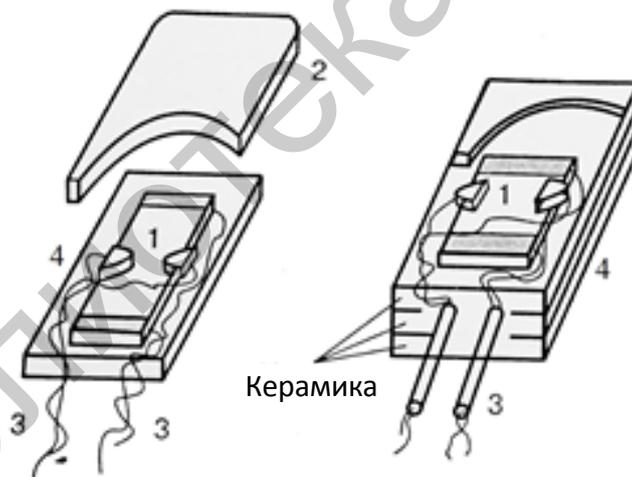
Рисунок 18.5 – Топология дискретных элементов Холла

Конструкция элементов Холла определяется областью их возможного применения. Различают бескорпусные (рисунок 18.6) и корпусные (рисунок 18.7) виды конструкции датчиков Холла.



1 – магниточувствительный элемент; 2 – проволочный вывод; 3 – покрытие из эпоксидной смолы; 4 – балочный вывод; 5 – подложка изолирующего материала; 6 – контактные площадки

Рисунок 18.6 – Варианты бескорпусного исполнения датчиков Холла



1 – магниточувствительный элемент; 2 – крышка; 3 – выводы; 4 – керамический корпус

Рисунок 18.7 – Вариант размещения элементов Холла в керамическом корпусе

Возможны варианты герметизации кристаллов датчиков Холла в металлоглазном, пластмассовом, керамическом корпусах.

Некоторые типы преобразователей Холла и их параметры даны в таблице 18.2.

Таблица 18.2

Марка преобразователя Холла	Размер, мм	Сопротивление, Ом		Ток управления, мА	Удельная чувствительность, Ом/Тл	Температурный коэффициент ЭДС, °С ⁻¹	Температурный коэффициент сопротивления, °С ⁻¹	Диапазон рабочих температур, °С
		входа	выхода					
ПХЭ 602 117 А	3-3-0,6	20	20	80	0,5	±0,1	0,5	-270...100
ПХЭ 605 817Б	2-2-0,6	5	5	100	0,08	±0,01	0,5	-270...100
ПХЭ 606 118 Б	2-1,5-0,6	10	10	100	0,03	±0,005	0,5	-270...100
ПХЭ 607 817 А	1-1-0,6	10	10	100	0,03	±0,02	0,5	-270...100
ПХИ 311	3-3-1	2·10 ³	2·10 ³	5	0,1	±0,1	0,5	-50...150
ХАГ-П	4-2-0,25	200...3·10 ³	200...3·10 ³	3...15	(1,2...45)·10 ³	±0,2	0,6	-60...125
ХИМ	4-2-0,35	6...50	2...50	20...15110	2...30	0,03...0,02	0,05...0,3	-60...100
ХИС	4-3-0,37	2...10	2...10	0	0,9...4	5·10 ⁻³	0,02	-270...70
Х511	1,5-0,8-0,2	5	5	110	0,8	0,03	-	-196...180

18.5 Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя образец, измерить его толщину.
- 2 Подсоединить образец к макету или собрать электрическую цепь согласно рисунку 18.1.
- 3 Измерить напряженность магнитного поля между полюсами магнита (электромагнита).
- 4 Включить вилки используемых в работе приборов в сеть. Включить тумблер СЕТЬ.
- 5 Расположить образец между полюсами магнита (электромагнита).
- 6 Выставляя регуляторами (резисторы R_1 , R_2) разные значения величины тока, протекающего через образец, замерить соответствующие ему значения напряжения U_x .
- 7 Выбрать на измерительных приборах нужные пределы измерений. Величина тока, подаваемая на образец, может составлять сотни миллиампер.
- 8 Выполнить измерения 12 раз и данные измерений записать в таблицу 18.1.
- 9 Оформить отчет по рекомендуемой форме.

18.6 Форма отчета о работе

Лабораторная работа № ___

Номер учебной группы _____

Фамилия, инициалы обучающегося _____

Дата выполнения работы _____

Тема работы: _____

Цель работы: _____

Задание: _____

Оснащение работы: _____

Результаты выполнения работы: _____

18.7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Эффект Холла, его физическая сущность.
- 2 Определение постоянной Холла.
- 3 Постоянная Холла в образцах с одним типом носителей тока и с двумя.
- 4 Зависимость постоянной Холла для полупроводников от температуры.
- 5 Датчики Холла.
- 6 Основные параметры датчиков Холла, их применение.

Приложение А
(справочное)

Пример оформления титульного листа отчета

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Филиал
«Минский радиотехнический колледж»

Лаборатория «Физика твердого тела,
микро- и наноэлектроники»

Лабораторная работа _____
(порядковый номер)

(название работы)

Выполнил учащийся гр. _____
(ФИО учащегося)

Принял _____
(ФИО преподавателя)

Минск (год)

Литература

Нормативные документы

1 ГОСТ 2.702–75 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. – Введ. 1977–07–01 ; с изм. – М. : Изд-во стандартов, 2000.

2 ГОСТ 2.721–74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения. – Взамен ГОСТ 721–68 ; введ. 1975–07–21 ; с изм. – М. : Изд-во стандартов, 1998.

3 ГОСТ 2.723–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители. – Введ. 1971–01–01 ; с изм. – М. : Изд-во стандартов, 2002.

4 ГОСТ 2.725–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутирующие. – Введ. 1971–01–01 ; с изм. – М. : Стандартиформ, 2010.

5 ГОСТ 2.728–74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. – Взамен ГОСТ 2.728–68 ; введ. 1975–07–01 ; с изм. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002.

6 ГОСТ 2.730–73 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые. – Взамен ГОСТ 2.730–68 ; введ. 1974–07–01 ; с изм. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002.

7 ГОСТ 2.732–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Источники света. – Введ. 1971–01–01 ; с изм. – М. : Стандартиформ, 2010.

8 ГОСТ 2.746–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Генераторы и усилители квантовые. – Введ. 1971–01–01 ; с изм. – М. : Изд-во стандартов, 2001.

9 ГОСТ 2.747–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений. – Введ. 1971–01–01 ; с изм. – М. : Изд-во стандартов, 2001.

10 ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – Взамен ГОСТ 8.417–81 ; введ. 2003–09–01. – М. : Изд-во стандартов, 2003.

11 ГОСТ 20.57.406–81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – Введ. 1982–01–01 ; с изм. – М. : Стандартиформ, 2005.

Основная

12 Артамонов, Б. И. Источники электропитания радиоустройств : учебник / Б. И. Артамонов, А. А. Бокуняев. – М. : Энергоиздат, 1982.

13 Афонский, А. А. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : ДМК-Пресс, 2012.

14 Барыбин, А. А. Физико-технологические основы макро-, микро- и нанoeлектроники / А. А. Барыбин, В. И. Шаповалов, В. И. Томилин ; под общ. ред. А. А. Барыбина. – М. : Физматлит, 2011.

15 Бурбаева, Н. В. Основы полупроводниковой электроники / Н. В. Бурбаева, Т. С. Днепровская. – М. : Физматлит, 2012.

16 Василевская, Н. И. Физика твердого тела и активных элементов микросхем : лаб. практикум / Н. И. Василевская, М. Ф. Прудник, А. Ф. Прудник. – Минск : МГВРК, 1999.

17 Вдовикин, А. И. Занимательные электронные устройства / А. И. Вдовикин. – М. : Радио и связь, 1981.

18 Гершунский, Б. С. Основы электроники и микроэлектроники / Б. С. Гершунский. – М. : Высш. шк., 1989.

19 Грундман, М. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технологические приложения / М. Грундман ; пер. с англ. ; под ред. В. А. Гергеля. – М. : Физматлит, 2012.

20 Гуревич, А. Г. Физика твердого тела : учеб. пособие / А. Г. Гуревич. – СПб. : Невский диалект, 2004.

21 Гуртов, В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие / В. А. Гуртов. – 2-е изд., доп. – М. : Техносфера, 2007.

22 Епифанов, Г. И. Твердотельная электроника : учебник / Г. И. Епифанов, Ю. А. Мома. – М. : Высш. шк., 1986.

23 Епифанов, Г. И. Физика твердого тела : учеб. пособие / Г. И. Епифанов. – 3-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2010.

24 Ковтонюк, Н. Ф. Измерения параметров полупроводниковых материалов / Н. Ф. Ковтонюк, Ю. А. Концевой. – М. : Металлургия, 1970.

25 Лысов, В. Ф. Практикум по физике полупроводников : учеб. пособие / В. Ф. Лысов. – М. : Просвещение, 1976.

26 Павлов, Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов : учеб. пособие / Л. П. Павлов. – М. : Высш. шк., 1975.

27 Полянкевич, А. Н. Электронные микроскопы / А. Н. Полянкевич. – Киев : Киевск. ун-т, 1976.

28 Прудник, М. Ф. Функциональная микроэлектроника : лаб. практикум / М. Ф. Прудник, А. М. Прудник. – Минск : МГВРК, 2000.

29 Справочник по схемотехнике для радиолюбителей / В. П. Боровский [и др.]. – Киев : Техника, 1987.

30 Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1986–1988. – 3 т.

31 Топильский, В. Б. Схемотехника измерительных устройств / В. Б. Топильский. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.

32 Фрумкин, Г. Д. Расчет и конструирование радиоаппаратуры : учебник / Г. Д. Фрумкин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1989.

33 Шишкин, Г. Г. Нанозлектроника. Элементы, приборы, устройства : учеб. пособие / Г. Г. Шишкин, И. М. Агеев. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.

34 Щука, А. А. Нанозлектроника / А. А. Щука. – М. : Физмат-книга, 2007.

35 Юдин, М. В. Ноутбук с Windows 7. Полное руководство / М. В. Юдин, А. В. Куприянова, Р. Г. Прокди. – М. : Наука и техника, 2012.

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа №1 Оптические приборы, используемые для измерения расстояний	5
Лабораторная работа №2 Определение ориентации кристаллографических плоскостей методом фигур травления и плотности дислокаций на поверхности простых и сложных полупроводников	18
Лабораторная работа №3 Исследование зависимости сопротивления проводников от температуры	23
Лабораторная работа №4 Определение удельного сопротивления полупроводников	30
Лабораторная работа №5 Исследование зависимости электропроводимости полупроводников от температуры	38
Лабораторная работа №6 Определение энергии ионизации (активации) примесей и ширины запрещенной зоны полупроводников	42
Лабораторная работа №7 Исследование зависимости сопротивления полупроводников от света (фотопроводимость)	47
Лабораторная работа №8 Исследование зависимости ВАХ выпрямительных диодов от температуры	52
Лабораторная работа №9 Определение контактной разности потенциалов на границе контакта металл – полупроводник	59

Лабораторная работа №10 Исследование параметров и характеристик светоизлучающего диода	64
Лабораторная работа №11 Исследование характеристик фотодиодов	73
Лабораторная работа №12 Исследование фотодиода как источника фотоЭДС	80
Лабораторная работа №13 Исследование основных параметров и характеристик фоторезистора	84
Лабораторная работа №14 Исследование основных параметров и характеристик биполярного транзистора	90
Лабораторная работа №15 Исследование параметров и характеристик канального транзистора	101
Лабораторная работа №16 Определение коэффициента теплопроводности твердых тел (проводников)	108
Лабораторная работа №17 Исследование основных параметров лазера	115
Лабораторная работа №18 Определение концентрации носителей заряда в полупроводниках с помощью эффекта Холла	128
Приложение А Пример оформления титульного листа отчета	136
Литература	137

Учебное издание

**Анкуда Сергей Николаевич
Прудник Михаил Федорович
Шаталова Виктория Викторовна**

**ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. И. Герман*

Компьютерная правка, оригинал-макет *Е. Г. Бабичева*

Подписано в печать 27.12.2017. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 50 экз. Заказ 194.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6